

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

y Sistemas de Telecomunicación



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ACÚSTICA DE
LA EDIFICACIÓN Y MEDIO AMBIENTE**

**ESTUDIO DE LA PRECISIÓN EN LA DETERMINACIÓN
DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN
TUBO DE IMPEDANCIA**

HÉCTOR ARNAY SARABIA

Mayo de 2014



Máster en Ingeniería Acústica de la Edificación y Medio Ambiente

Trabajo Fin de Máster		
Título	Estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia	
Autor	Héctor Arnay Sarabia	VºBº
Tutor	Juan Sancho Gil	
Ponente		
Tribunal		
Presidente	Vicente González Posadas	
Secretario	Constantino Gil González	
Vocal	Antonio Pedrero González	
Fecha de lectura		
Calificación		

El Secretario: Constantino Gil González

Índice

Índice	i
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	ix
Resumen	xii
Summary	xiii
1 Introducción y objetivos.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.	4
1.3. Estructura del trabajo.	5
2 Determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia	7
2.1. Introducción.....	8
2.2. Fundamentos teóricos.....	10
2.2.1. Longitud de onda y número de onda.....	10
2.2.2. Frente de onda.	11
2.2.3. Ondas planas.	11
2.2.4. Propagación del sonido en un tubo.	12
2.2.5. Reflexión.....	14
2.2.6. Absorción acústica.	17
2.2.7. Impedancia acústica específica.....	18
2.2.8. Función de transferencia.....	19
2.3. Método de ensayo según UNE-EN ISO 10534-2:2002.....	22
2.3.1. Fundamentos del método.....	22

2.3.2. Requisitos de la instrumentación.....	23
2.3.2.1. Tubo de impedancia.	23
2.3.2.2. Altavoz.	23
2.3.2.3. Micrófonos.	24
2.3.2.4. Instrumentación utilizada para el procesado de las señales.	25
2.3.3. Intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia.	25
2.3.4. Procedimiento de ensayo.	26
2.3.4.1. Conexión de la instrumentación.....	26
2.3.4.2. Mediciones de control.	27
2.3.4.3. Montaje de la muestra de ensayo.....	28
2.3.4.4. Corrección por desajuste entre los canales de entrada de los micrófonos.	28
2.3.4.5. Determinación de los parámetros acústicos.	31
2.4. Aplicación práctica del método de ensayo.	33
2.4.1. Entorno de medida.	33
2.4.2. Instrumentación empleada.	33
2.4.3. Comprobación de los requisitos de la instrumentación.	36
2.4.4. Determinación del intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia.	37
2.4.5. Procedimiento de ensayo.	40
2.4.5.1. Montaje de la instrumentación.	40
2.4.5.2. Confección y colocación de la muestra de ensayo.	41
2.4.5.3. Señal de excitación empleada.	43

2.4.5.4. Medición de la función de transferencia.	45
2.4.5.5. Determinación del coeficiente de absorción acústica.	46
2.4.6. Coeficiente de absorción determinado en los ensayos.	49
3 Evaluación de la incertidumbre de medida del ensayo	51
3.1. Concepto de incertidumbre.	52
3.2. Propagación de distribuciones. Método de Monte Carlo.....	54
3.2.1. Introducción.	54
3.2.2. Fases principales de la evaluación de la incertidumbre.	56
3.2.3. Propagación de distribuciones.	57
3.2.4. Método de Monte Carlo.	58
3.2.4.1. Número de reiteraciones en el método de Monte Carlo.	61
3.2.4.2. Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad.	62
3.2.4.3. Evaluación del modelo.	62
3.2.4.4. Representación discreta de la función de distribución de Y.	62
3.2.4.5. Estimación de la magnitud de salida y de su incertidumbre típica asociada.....	62
3.2.4.6. Intervalo de cobertura para una magnitud de salida.....	63
3.2.5. Comparación entre el enfoque GUM y el método de Monte Carlo descrito.	64
3.3. Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo.	65
3.3.1. Modelo matemático.	66
3.3.2. Magnitudes de entrada.....	67
3.3.3. Procedimiento de cálculo.	68

3.3.3.1. Programas empleados.....	68
3.3.3.2. Número de reiteraciones M	68
3.3.3.3. Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad.	69
3.3.3.4. Evaluación del modelo.....	71
3.3.3.5. Representación discreta G de la función de distribución del coeficiente de absorción acústica.	72
3.3.3.6. Estimación de α y de su incertidumbre típica asociada u	72
3.3.3.7. Intervalo de cobertura para α	73
3.3.4. Presentación de resultados.....	75
3.3.5. Coeficientes de absorción e incertidumbres asociadas de varios ensayos.	76
4 Precisión del método de ensayo	79
4.1. Introducción.....	80
4.2. Estudios de precisión del método de ensayo.....	83
4.2.1. Influencia del número de mediciones en la incertidumbre de medida.	83
4.2.2. Influencia de la colocación de la muestra en la repetibilidad del método de ensayo.....	88
4.2.3. Influencia del corte de la muestra en la repetibilidad del método de ensayo.....	94
4.2.4. Relevancia de posibles desviaciones en la medida de la temperatura durante un ensayo.....	103
4.2.4.1. En la determinación del coeficiente de absorción acústica.	104
4.2.4.2. En la determinación de la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción acústica.....	106

4.2.5. Relevancia de posibles desviaciones en la medida de la distancia entre los micrófonos.	109
4.2.5.1. En la determinación del coeficiente de absorción acústica.	110
4.2.5.1. En la determinación de la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción acústica.	113
5 Conclusiones y futuras líneas de investigación	118
5.1. Conclusiones.....	119
5.2. Futuras líneas de investigación.....	121
ANEXOS	122
ANEXO A Procedimiento de cálculo para la presentación del coeficiente de absorción acústica en bandas de tercio de octava.....	123
ANEXO B Muestra de calibración.	125
ANEXO C Procedimiento de cálculo de los parámetros acústicos en una hoja de cálculo Excel.....	126
ANEXO D Parámetros acústicos de los materiales ensayados.	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

Índice de figuras

Figura 2.1	Frentes de onda circular (izquierda) y plano (derecha).....	11
Figura 2.2	Propagación de una perturbación en un tubo.	13
Figura 2.3	Reflexión y transmisión de ondas planas en una superficie plana....	16
Figura 2.4	Absorción del sonido.	18
Figura 2.5	Diagrama de conexionado de la instrumentación de ensayo.....	27
Figura 2.6	Configuración I (configuración estándar).	29
Figura 2.7	Configuración II (configuración con los micrófonos intercambiados).	30
Figura 2.8	Tubo de impedancia ACUPRO.	35
Figura 2.9	Diagrama de montaje.	40
Figura 2.10	Colocación del micrófono.	41
Figura 2.11	Equipamiento empleado en el proceso de confección de la muestra de ensayo.....	41
Figura 2.12	Proceso de colocación de la muestra de ensayo.....	42
Figura 2.13	Muestra de ensayo: lana de roca 50 <i>mm</i> ROCKWOOL (izquierda) y lana mineral CLIMAVER NETO 25 <i>mm</i> ISOVER (derecha).....	43
Figura 2.14	Diagrama de montaje para señal de excitación MLS.	44
Figura 2.15	Coeficientes de absorción determinados con diferentes señales de excitación.	44
Figura 2.16	Configuración del software ACUPRO.	47
Figura 2.17	Visualización de los parámetros acústicos en el software ACUPRO.	48
Figura 3.1	Mensurando y su incertidumbre asociada.....	52
Figura 3.2	Ilustración de la propagación de distribuciones.	58

Figura 3.3	Procedimiento de evaluación de la incertidumbre mediante el método de Monte Carlo.....	60
Figura 3.4	Propagación de distribuciones normal y rectangular.	71
Figura 3.5	Propagación de distribuciones de las 6 magnitudes de entrada para obtener la FDP del coeficiente de absorción acústica.	72
Figura 3.6	Representación discreta G de la función de distribución de probabilidad de α en la frecuencia discreta de 200 Hz	74
Figura 3.7	Función de densidad de probabilidad de α o histograma de α en la frecuencia discreta de 200 Hz	74
Figura 4.1	Límites de repetibilidad disponibles del método de ensayo.	82
Figura 4.2	Límites de reproducibilidad disponibles del método de ensayo.	82
Figura 4.3	Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 1 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.	85
Figura 4.4	Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 2 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.	85
Figura 4.5	Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 1 de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 mm de ISOVER.....	86
Figura 4.6	Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 2 de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 mm de ISOVER.....	86
Figura 4.7	Desviaciones típicas de repetibilidad debidas a la colocación de la muestra.	93
Figura 4.8	Muestras de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL. A) Muestra 1, B) Muestra 2, C) Muestra 3 y D) Muestra 4.	95
Figura 4.9	Muestras de lana mineral de 25 mm de espesor de ISOVER. A) Muestra 1, B) Muestra 2, C) Muestra 3 y D) Muestra 4.	96
Figura 4.10	Desviaciones de repetibilidad debidas al corte de la muestra.	98

Figura 4.11	Comparación U del ensayo y s_r de la intercomparación del material de lana de roca de ROCKWOOL.	102
Figura 4.12	Comparación U del ensayo y s_r de la intercomparación del material de lana mineral de ISOVER.	102
Figura 4.13	Comparativa de valores de α con T medido y con mayor desviación de T	106
Figura 4.14	Comparativa de valores de U con mínima y máxima desviación de T	109
Figura 4.15	Comparativa de valores de α con s del fabricante (0,0286 m) y con mayor desviación de s (0,0306 m).	113
Figura 4.16	Comparativa de valores de U con mínima desviación de s (0,00005 m) y con desviación de 0,001 m	117
Figura B.1	Muestra de calibración (espuma AAP 95).	125
Figura B.2	Coeficiente de absorción de la muestra de calibración.	125
Figura C.1	Parte real (arriba) e imaginaria (abajo) de los coeficientes de reflexión de la muestra de calibración obtenidos en Excel y en ACUPRO.	127
Figura C.2	Coeficientes de absorción de la muestra de calibración obtenidos en Excel y en ACUPRO.	128
Figura C.3	Parte real (arriba) e imaginaria (abajo) de la impedancia acústica específica obtenida en Excel y en ACUPRO.	129
Figura C.4	Parte real (arriba) e imaginaria (abajo) de la admitancia acústica específica obtenida en Excel y en ACUPRO.	130

Índice de tablas

Tabla 2.1	Instrumentación.....	34
Tabla 2.2	Valores asignados en la intercomparación al α del material de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL y del material de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER.....	50
Tabla 3.1	Magnitudes de entrada y sus FDP.....	67
Tabla 3.2	Coeficientes de absorción e incertidumbres asociadas obtenidos en cuatro ensayos de muestras de lana de roca de ROCKWOOL.	77
Tabla 3.3	Coeficientes de absorción e incertidumbres asociadas obtenidos en cuatro ensayos de muestras de lana mineral CLIMAVER NETO de ISOVER.....	78
Tabla 4.1	Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 1 de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL.	89
Tabla 4.2	Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 2 de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL.	90
Tabla 4.3	Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 1 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER.....	91
Tabla 4.4	Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 2 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER.....	92
Tabla 4.5	Incertidumbres y desviaciones típicas de repetibilidad correspondientes a las tres medidas de cada muestra de ensayo.	94
Tabla 4.6	Desviación típica de repetibilidad y límite de repetibilidad de las cuatro muestras de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL.....	97

Tabla 4.7	Desviación típica de repetibilidad y límite de repetibilidad de las cuatro muestras de lana mineral CLIMAVAR NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER.....	98
Tabla 4.8	Desviación típica de repetibilidad de cada ensayo y repetibilidad media de la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1.	99
Tabla 4.9	Incertidumbres y desviaciones típicas de repetibilidad incluyendo el efecto producido por el corte de las muestras.	101
Tabla 4.10	Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL con distintos valores de T	104
Tabla 4.11	Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana mineral CLIMAVAR NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER con distintos valores de T	105
Tabla 4.12	Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL con distintos intervalos de variación de T .	107
Tabla 4.13	Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana mineral CLIMAVAR NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER con distintos intervalos de variación de T .	108
Tabla 4.14	Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL con distintos valores de s	111
Tabla 4.15	Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana mineral CLIMAVAR NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER con distintos valores de s .	112
Tabla 4.16	Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL con distintos intervalos de variación de s .	115

Tabla 4.17	Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER con distintos intervalos de variación de s	116
Tabla A.1	Frecuencias centrales y laterales de los tercios de octava de 100 <i>Hz</i> a 5000 <i>Hz</i>	124
Tabla D.1	Parámetros acústicos del material de lana de roca de 50 <i>mm</i> de ROCKWOOL, modelo 231.652.	132
Tabla D.2	Parámetros acústicos del material de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 <i>mm</i> de ISOVER.	133

Resumen

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es estudiar la precisión de los resultados obtenidos en la medición del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia, según la norma UNE-EN ISO 10534-2 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”*.

En primer lugar, se han estudiado los fundamentos teóricos relacionados con el método de ensayo. A continuación, se ha detallado dicho método y se ha aplicado a un caso práctico con la instrumentación disponible en el laboratorio de Acústica de la Escuela.

En relación a la precisión del método se ha analizado si la preparación e instalación de la muestra son causas de imprecisión. Para ello, se han realizado varios ensayos con dos tipos de materiales acústicos, con el fin de estudiar la dispersión entre los resultados que produce tanto el corte de la muestra, realizado en el proceso de confección, como su colocación en el tubo de impedancia. Además, se ha estudiado si desviaciones en la medida de la temperatura y de la distancia entre los micrófonos influyen en los valores del coeficiente de absorción acústica medido y de su incertidumbre asociada.

Puesto que el resultado de un ensayo únicamente se halla completo cuando está acompañado de una declaración acerca de la incertidumbre de dicho resultado, en el presente trabajo se ha aplicado a este método de ensayo un procedimiento para estimar la incertidumbre empleando el método de Monte Carlo.

Summary

The objective of this project is studying the precision of the measurements of sound absorption coefficient in impedance tube, according to standard UNE-EN ISO 10534-2 *“Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method”*.

Firstly, theoretical basis related to the test method have been studied. Furthermore, this method has been defined and applied to a particular case with the instrumentation available in the Acoustics laboratory of the College.

In relation to the precision of the method, the preparation and installation of the test sample have been analyzed as possible causes of imprecision. For this purpose, two types of acoustic materials have been tested in order to study the deviation between the results produced by the cutting of the test sample and the collocation in impedance tube. In addition, it has been studied if deviations in the measurement of the temperature and distance between microphones may influence the sound absorption coefficient measured and its associated uncertainty.

The test result must be accompanied by a statement of the uncertainty of the result. For this reason, in this project a procedure for estimating uncertainty of the result of this test method has been applied using the Monte Carlo method.

1 Introducción y objetivos

1.1. Introducción.

La acústica arquitectónica, desde el campo del acondicionamiento acústico, estudia la forma de distribuir la energía sonora en un recinto, de tal manera que un espectador en él, reciba el mensaje transmitido de forma óptima independientemente de su ubicación. Para ello, es necesario llevar a cabo un tratamiento de las superficies interiores del recinto, con el fin de lograr un adecuado grado de absorción y difusión del sonido. Conseguir una absorción apropiada del sonido es uno de los problemas fundamentales con los que se enfrenta un ingeniero cuando desea acondicionar acústicamente un recinto. Afortunadamente, existen multitud de materiales que tienen la capacidad de absorber energía acústica. Las propiedades absorbentes de sonido de un material se expresan mediante el coeficiente de absorción acústica α en función de la frecuencia. Basándose en este parámetro, se decide qué materiales son más adecuados para revestir las paredes interiores de un recinto. Por tanto, para poder emplear un determinado material en un proyecto de acondicionamiento acústico, es imprescindible conocer previamente su coeficiente de absorción acústica.

Actualmente, existen varios métodos para medir el coeficiente de absorción acústica de un material. Uno de ellos, en el cual se centra el presente trabajo, consiste en medir las propiedades acústicas de un material utilizando un tubo de impedancia, tal y como se expone en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”*.

Un método de ensayo se puede caracterizar por su precisión, que se define como el grado de coincidencia existente entre los resultados independientes de un ensayo, obtenidos en condiciones especificadas. Es importante disponer de datos de precisión de un método de ensayo, que sirvan de referencia a los laboratorios para poder evaluar su propia precisión en la aplicación del método de ensayo. Los mejores datos de precisión disponibles se obtienen participando en los ejercicios de intercomparación. Dichos ejercicios consisten en la organización, realización y evaluación de mediciones o ensayos sobre el mismo ítem, o ítems similares, por dos o más laboratorios participantes, de acuerdo con condiciones preestablecidas. Los estudios de intercomparación permiten conocer la desviación típica de repetibilidad conjunta, s_r , y la desviación típica de reproducibilidad, s_R , ambas definidas en el capítulo 4 *“Precisión del método de ensayo”* del presente trabajo, que constituyen los mejores datos de precisión del método de ensayo. La norma UNE 82009-2:1999,

equivalente a la ISO 5725-2:1994, aborda el tratamiento estadístico de los resultados de los participantes con el fin de determinar estos datos de precisión. Además, estos ejercicios de intercomparación sirven como prueba de aptitud a los participantes y mejora el conocimiento del estado del arte en la aplicación del método de ensayo bajo estudio.

El presente trabajo se centra en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia mediante el método de la función de transferencia. En el momento de la publicación de la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002, este método no disponía de información relativa a la reproducibilidad y repetibilidad del método. Es por eso, que en dicha norma se recomienda obtener esta información a partir de ensayos de intercomparación entre laboratorios. A raíz de esto, a finales de 2013, se llevó a cabo un programa de intercomparación de ámbito internacional de este método de ensayo, denominado AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1, en el cual participaron 9 laboratorios, uno de ellos la Escuela (ETSIST), ensayando dos tipos de materiales. Este programa fue organizado por la red de laboratorios de acústica ACUSTILAB, que se ubica dentro de EUROLAB-España.

Con objeto de recabar información adicional referente a la precisión del método de la función de transferencia, se dispuso de la norma ASTM E1050-90 (1998) *“Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”*, publicada por ASTM International (American Society for Testing and Materials) que es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grande del mundo. La norma ASTM E1050-90 describe el método de la función de transferencia y, a diferencia de la norma UNE-EN ISO 10534-2, sí proporciona datos de repetibilidad y reproducibilidad del método, obtenidos en un programa de prueba (round-robin) en el que participaron 10 laboratorios estudiando un tipo de material.

Por otra parte, hoy en día, los laboratorios deben demostrar que sus métodos analíticos proporcionan resultados fiables y adecuados para la finalidad o propósito perseguidos, ya que muchas de las decisiones que se toman están basadas en la información que estos resultados proporcionan. La fiabilidad de los resultados se demuestra verificando la trazabilidad del método. Además, es necesario suministrar un parámetro que proporcione una idea del grado de confianza de los resultados, es decir, que refleje lo que puede alejarse el resultado del valor considerado verdadero. Este parámetro se conoce como incertidumbre de medida. En definitiva, los clientes exigen resultados de calidad, es decir, trazables y precisos. Dentro de la precisión se

exige la estimación de la incertidumbre aplicando un procedimiento documentado. Los procedimientos para la evaluación de la incertidumbre deberán ser coherentes con los datos de precisión del método.

Actualmente, en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia mediante el método de la función de transferencia, los laboratorios no proporcionan la incertidumbre asociada al resultado, debido a la dificultad que conlleva aplicar, en este método de ensayo, el enfoque clásico de la GUM para la evaluación de la incertidumbre. Como consecuencia, surge la necesidad de estudiar un procedimiento que permita evaluar la incertidumbre asociada al coeficiente de absorción acústica determinado en tubo de impedancia, mediante el método de la función de transferencia.

1.2. Objetivos.

El objetivo principal del presente trabajo es llevar a cabo un estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal medido en tubo de impedancia, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2.

A partir del mencionado objetivo general, los objetivos específicos que este Trabajo Fin de Máster pretende conseguir son:

- Afianzar los conocimientos sobre este método de ensayo para poder aplicarlo correctamente.
- Estudiar si la preparación y la instalación de la muestra de ensayo, es decir, el corte de la muestra y su colocación en el tubo de impedancia, son causas de imprecisión del método.
- Analizar la influencia en la precisión del método de distintas magnitudes involucradas en la determinación del coeficiente de absorción acústica.
- Aplicar una metodología rigurosa para estimar la incertidumbre asociada al resultado de un ensayo empleando el método de Monte Carlo.

1.3. Estructura del trabajo.

Para conseguir los objetivos anteriormente mencionados, se ha optado por estructurar este trabajo en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- Capítulo 2. Determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia.
- Capítulo 3. Evaluación de la incertidumbre de medida del ensayo.
- Capítulo 4. Precisión del método de ensayo.
- Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

A continuación, se describen brevemente:

En el capítulo 1 se introduce el tema del trabajo y se relatan los objetivos del mismo.

El capítulo 2 se centra en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia, mediante el método de la función de transferencia descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002. En primer lugar, se exponen los fundamentos teóricos relacionados con el método de ensayo. A continuación, se detalla el método de ensayo y, por último, se aplica el método a un caso práctico con la instrumentación disponible en el laboratorio de Acústica de la Escuela.

En el capítulo 3 se ilustra la metodología para estimar la incertidumbre de medida empleando el método de Monte Carlo, descrita en el Suplemento 1 de la guía GUM, y se aplica dicha metodología al método de ensayo bajo estudio, con el fin de estimar la incertidumbre asociada al coeficiente de absorción acústica determinado en un ensayo.

En el capítulo 4 se estudia la precisión del método de ensayo. Por un lado, se estudia la influencia de la colocación y el corte de las muestras en la repetibilidad del método. Por otro lado, se analiza en qué medida posibles errores en la medida de la temperatura y la distancia entre micrófonos influyen en los valores del coeficiente de absorción medido y de su incertidumbre asociada. Además, se lleva a cabo un estudio

en el que se pretende determinar cuantas medidas de una muestra es aconsejable realizar.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo y se proponen una serie de futuras líneas de investigación en las que seguir trabajando en este ámbito.

Además, el trabajo incluye los siguientes ANEXOS:

- ANEXO A: Procedimiento de cálculo para la presentación del coeficiente de absorción acústica en bandas de tercio de octava.
- ANEXO B: Muestra de calibración.
- ANEXO C: Procedimiento de cálculo de los parámetros acústicos en una hoja de cálculo Excel.
- ANEXO D: Parámetros acústicos de los materiales ensayados.

2

Determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia

2.1. Introducción.

Conocer el coeficiente de absorción acústica de un material es de gran importancia en aquellos ámbitos en que se necesita un tratamiento acústico, como es el caso del acondicionamiento acústico de recintos. Un método muy conocido para la medición del coeficiente de absorción acústica de un material es el que se lleva a cabo en cámara reverberante y está descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004 *“Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”*. También existe la posibilidad de medir las propiedades acústicas de un material utilizando un tubo de impedancia, tal y como se expone en la norma UNE-EN ISO 10534:2002 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”*. Esta norma consta de dos partes en las que se describen dos métodos de ensayo:

- 1) Parte 1: Método del rango de onda estacionaria.
- 2) Parte 2: Método de la función de transferencia.

Tanto el método del rango de onda estacionaria como el método de la función de transferencia determinan el coeficiente de absorción para incidencia normal (incidencia perpendicular a la superficie del material), situando la muestra del material en un extremo del tubo y el altavoz en el otro extremo. Sin embargo, siguen procedimientos de medida diferentes.

El método del rango de onda estacionaria emplea una onda plana sinusoidal que incide en la muestra y se refleja originando, mediante superposición de la onda incidente y reflejada, un sistema de ondas estacionarias en el tubo. La evaluación se basa en las magnitudes medidas de los niveles de presión sonora en los mínimos de presión y en los máximos de presión. Estos datos son suficientes para determinar el coeficiente de absorción acústica del material.

En el método de la función de transferencia se generan ondas planas en el interior del tubo empleando una señal aleatoria o pseudo-aleatoria y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones cercanas a la muestra. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usará para calcular el coeficiente de absorción acústica del material. Este método de ensayo

pretende proporcionar una alternativa, generalmente mucho más rápida, al método del rango de onda estacionaria.

Entre el método de la cámara reverberante y el método del tubo de impedancia hay algunas diferencias a destacar:

El método de la cámara reverberante requiere un recinto especial (cámara reverberante) para realizar las medidas. Por el contrario, el método del tubo de impedancia puede llevarse a cabo con instrumentación relativamente sencilla en un recinto normal.

El método de la cámara reverberante determina el coeficiente de absorción acústica bajo incidencia difusa (incidencia desde cualquier dirección), mientras que el método del tubo de impedancia bajo incidencia normal. Para materiales de reacción local, pueden estimarse los coeficientes de absorción para incidencia difusa a partir de los resultados de ensayo obtenidos por el método del tubo de impedancia.

El método del tubo de impedancia puede emplearse también para determinar, bajo incidencia normal, el coeficiente de reflexión así como la impedancia o la admitancia del material bajo estudio.

El método del tubo de impedancia es muy útil ya que permite hacer las medidas en condiciones definidas y controladas. Este método se basa en la existencia de una onda acústica incidente plana y da valores exactos en esas condiciones. La evaluación del coeficiente de absorción en cámara reverberante se basa en un cierto número de hipótesis de simplificación y aproximación relativas al campo acústico y al tamaño del absorbente. Por ello se obtienen, en ocasiones, coeficientes de absorción acústica mayores a 1.

En cuanto al tamaño de la muestra bajo estudio, el método de la cámara reverberante requiere muestras de ensayo más bien grandes, a diferencia del método del tubo de impedancia que necesita muestras del tamaño de la sección transversal del tubo. Por lo tanto, éste último es más conveniente para estudios de investigación y desarrollo, donde se dispone únicamente de pequeñas muestras del material. Sin embargo, el coeficiente de absorción de una pequeña muestra puede no ser representativo del de una muestra grande.

Una vez se han comentado los diferentes métodos para determinar el coeficiente de absorción de un material, solo cabe añadir que en el presente trabajo

se llevó a cabo el método de ensayo descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”*.

2.2. Fundamentos teóricos.

En este apartado se exponen los conceptos teóricos más importantes relacionados con la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia por el método de la función de transferencia.

2.2.1. Longitud de onda y número de onda.

La longitud de onda es la distancia existente entre dos puntos consecutivos de la onda que poseen la misma fase. Por ejemplo, la distancia entre dos máximos o mínimos consecutivos de la onda. La longitud de onda se representa por la letra griega “lambda” (λ), se mide en metros y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

donde c y f son la velocidad y la frecuencia de la onda, respectivamente.

La ecuación (2.1) indica que la longitud de onda y la frecuencia son dos magnitudes inversamente proporcionales, es decir, cuanto mayor es una, tanto menor es la otra. La longitud de onda de las ondas de sonido, en el rango en que los seres humanos pueden escuchar, oscila entre menos de 2 *cm* hasta aproximadamente 17 *m*.

El número de onda, representado como k , es el número de longitudes de onda que hay en un ciclo completo (2π radianes) y se mide en *rad/m*, aunque a menudo se indica solo como m^{-1} . A veces se le llama número de onda angular o número de onda circular.

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

siendo ω la frecuencia angular.

Si se considera un medio no lineal en el que se produce atenuación, ésta ha de tenerse en cuenta por lo que el número de onda será complejo:

$$k = k' - jk''$$

siendo

k' , la componente real ($k' = \frac{2\pi}{\lambda}$);

k'' , la componente imaginaria, es la constante de atenuación lineal en Nepers por metro.

2.2.2. Frente de onda.

Se denomina frente de onda al conjunto de puntos de la onda sonora que se encuentran en fase, o de otra forma, una superficie continua que es alcanzada por la perturbación en un mismo instante. Dentro de un tubo el frente de onda es plano si la longitud de onda es mayor que el diámetro del tubo, mientras que al aire libre el frente de onda es esférico. Atendiendo a la forma del frente de onda, las ondas se denominan esféricas, planas, cilíndricas, etc. A determinada distancia de la fuente las ondas esféricas pueden considerarse ondas planas. Para representar las ondas, se dibujan los frentes de onda separados una longitud de onda.

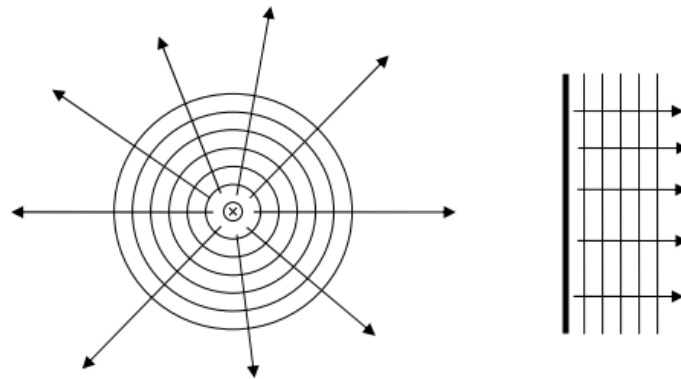


Figura 2.1 Frentes de onda circular (izquierda) y plano (derecha).

2.2.3. Ondas planas.

Una onda longitudinal es una onda en la que el movimiento de oscilación de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Una onda plana, también llamada onda unidimensional, es un tipo de onda longitudinal cuyo frente de onda representa un plano.

El sonido se propaga en línea recta en una sola dirección a lo largo del espacio a partir de la fuente y con una frecuencia constante. De acuerdo con la definición del frente de onda, los rayos acústicos le atraviesan normalmente y, por lo tanto, en la onda plana, los rayos son paralelos entre sí. Como consecuencia, el flujo de energía no se dispersa y la intensidad sonora no debería disminuir al alejarse de la fuente de sonido. No obstante, ésta disminuye, debido al amortiguamiento molecular, a la viscosidad del medio, a la contaminación del mismo, a la dispersión y otras pérdidas. Pero estas pérdidas son tan insignificantes, que en la propagación sonora a cortas distancias se puede prescindir de ellas. Por esta razón, generalmente se considera que la intensidad sonora en la onda plana no depende de la distancia hasta la fuente del sonido. La ley de atenuación para ondas planas indica que si se duplica la distancia de recorrido de la onda, la atenuación es de 0 dB. Debido a que la intensidad sonora es constante, la amplitud de la presión acústica y de la velocidad vibratoria tampoco depende de ésta distancia. Por tanto, las ondas planas se caracterizan porque todos los puntos poseen el mismo estado acústico, es decir, misma presión sonora y misma velocidad de partícula, formando los frentes de onda planos paralelos.

La ecuación general de propagación de las ondas planas a través de un medio puede obtenerse a partir de la ley de Newton aplicada en una cuerda elástica:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

donde ξ es el desplazamiento de la partícula desde la posición de equilibrio a lo largo del eje X ; la coordenada de una partícula desde la posición inicial (en el instante $t = 0$) está dada por x ; c es la velocidad de propagación de la onda.

2.2.4. Propagación del sonido en un tubo.

El sonido consiste en la propagación de una perturbación en el aire. Suponemos un tubo lleno de aire con un pistón en un extremo (en el presente trabajo es un altavoz). En el interior del tubo el aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas. Inicialmente el aire dentro del tubo está en reposo, o, más técnicamente, en equilibrio (Figura 2.2.a). Este equilibrio es dinámico, lo cual significa que las moléculas no están quietas, sino que se mueven caóticamente en todas las direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente repartidas en el interior del tubo. En otras palabras, en

cada centímetro cúbico de aire, ya sea cerca del pistón o lejos de él, hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas.

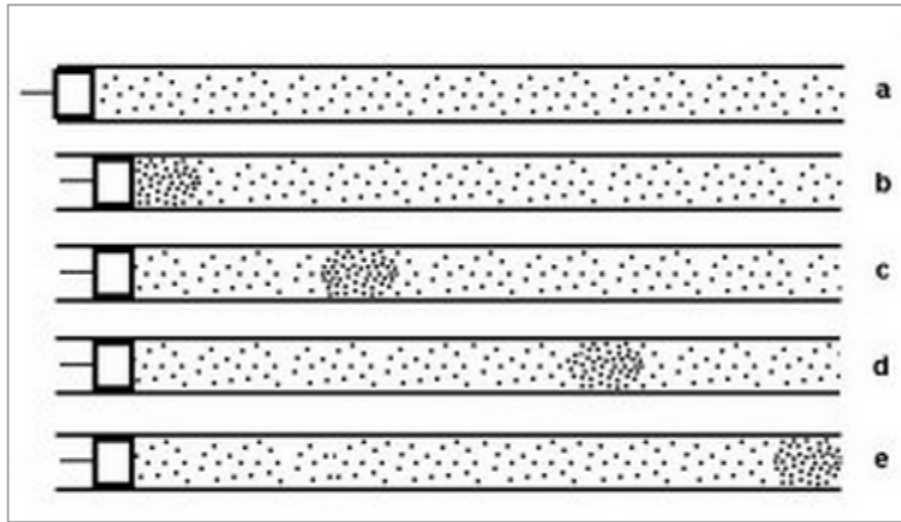


Figura 2.2 Propagación de una perturbación en un tubo.

Suponemos ahora que se desplaza rápidamente el pistón hacia el interior del tubo (Figura 2.2.b). Las moléculas que se encuentran junto al pistón serán empujadas por éste, mientras que las que se encuentran muy alejadas no. Esto implica que en la zona del pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir, habrá ahora más moléculas por centímetro cúbico cerca del pistón que lejos de él. El aire comprimido tiende a descomprimirse, desplazándose hacia la derecha y comprimiendo a su vez el aire que se encuentra próximo a él (Figura 2.2.c). Esta nueva compresión implica, otra vez, una tendencia a descomprimirse a costa de comprimir el aire contiguo (Figura 2.2.d y 2.2.e). El proceso se repite así en forma permanente, con lo cual la perturbación original (la compresión del aire cercano al pistón) se propaga a lo largo del tubo alejándose de la fuente de la perturbación (el pistón).

Asumamos que el fluido en un tubo, con área de sección transversal S y longitud L , es excitado por un pistón colocado en $x = 0$ y que el tubo termina en $x = L$. Si el pistón vibra con frecuencias para las cuales sólo se propagan ondas planas, es decir, la longitud de onda es mayor que el diámetro del tubo, la onda de presión en el tubo se describe mediante la superposición:

$$p(x, t) = Ae^{j[\omega t + k(L-x)]} + Be^{j[\omega t - k(L-x)]} \quad (2.4)$$

donde

A y B , son determinadas por las condiciones en la frontera, en $x = 0$ y $x = L$;

ω , es la frecuencia angular definida como:

$$\omega = kc \quad (2.5)$$

Además, la velocidad de partícula está dada por:

$$u(x,t) = \frac{k}{\rho_0 \omega} [Ae^{j[\omega t + k(L-x)]} - Be^{j[\omega t - k(L-x)]}] \quad (2.6)$$

donde ρ_0 es la densidad del medio.

2.2.5. Reflexión.

El fenómeno de reflexión se produce cuando una onda sonora que se propaga en un medio incide sobre la superficie de separación con otro medio cambiando la dirección de propagación de la onda, de tal forma que regresa al medio inicial.

Cuando una onda sonora incide en una superficie plana es reflejada de manera coherente. Sin embargo, si la superficie se considera rugosa frente a la longitud de onda de la onda incidente, la onda se refleja en todas direcciones dispersando la energía de la onda en lugar de reflejar el sonido en forma coherente. Además, la onda sonora se refleja si el tamaño de la superficie reflectante es lo suficientemente grande en relación con la longitud de onda de la onda que incide. Sin embargo, si la superficie es pequeña en relación con la longitud de onda el sonido la rodea produciéndose el fenómeno de difracción.

Se puede entender el mecanismo de la reflexión si se considera que las distintas presiones sonoras transportadas por la onda que incide contra un material hacen que este vibre. Parte de la energía vibratoria se devuelve al medio mediante la reflexión y la otra parte absorbida, se transforma en otros dos tipos de energía: la que se disipa en el medio y la que se transmite por el material.

A continuación, se desarrolla el fenómeno físico de reflexión de ondas planas acústicas. Para ello se asume que no hay pérdida de energía durante el proceso de propagación de la onda (el coeficiente de absorción es cero); también que no ocurre dispersión (medio homogéneo).

La onda de presión incidente (de izquierda a derecha) puede ser representada como:

$$P_i = A_1 e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (2.7)$$

donde

A_1 , es una constante igual a la amplitud de la onda incidente;

t , es el tiempo;

x , es la localización espacial;

ω , es la frecuencia angular;

k_1 , es el número de onda en el medio 1 ($k_1 = \omega / c_1$).

La onda incide normalmente sobre una superficie plana paralela que separa el primer medio homogéneo de un segundo con propiedades acústicas diferentes. Entonces la onda incidente experimentará en la superficie que divide los dos medios, reflexión y transmisión.

La onda de presión reflejada puede ser representada como:

$$P_r = B_1 e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (2.8)$$

donde

B_1 , es una constante igual a la amplitud de la onda reflejada;

Se toma positivo en el paréntesis porque va de derecha a izquierda.

De igual manera, la onda de presión transmitida puede ser representada como:

$$P_t = A_2 e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (2.9)$$

donde

A_2 , es una constante igual a la amplitud de la onda transmitida;

k_2 , es el número de onda en el medio 2 ($k_2 = \omega / c_2$).

La situación es descrita esquemáticamente en la Figura 2.3.

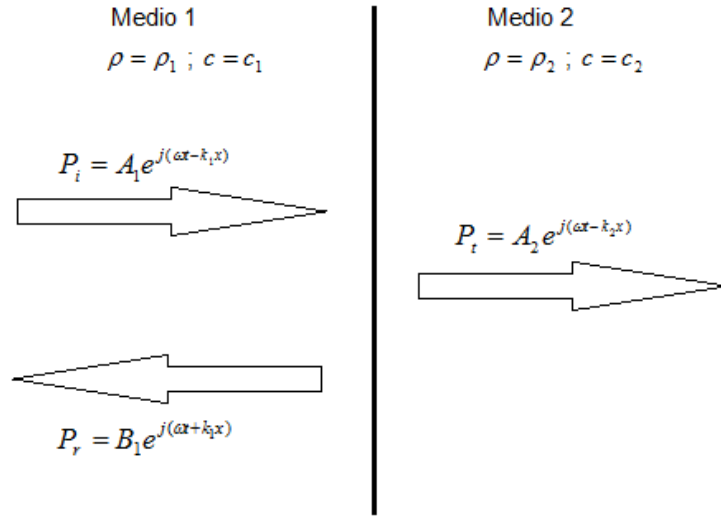


Figura 2.3 Reflexión y transmisión de ondas planas en una superficie plana.

Las condiciones frontera (para $x = 0$) son:

$$P_i + P_r = P_t \quad (2.10)$$

$$u_i + u_r = u_t \quad (2.11)$$

siendo u , la velocidad de la partícula, definida como:

$$u = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \int \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) dt \quad (2.12)$$

Si P es armónica y plana, entonces la dependencia espacial y temporal se puede separar tal que:

$$P(x, t) = P(x) e^{j\omega t} \quad (2.13)$$

Reemplazando la ecuación (2.13) en (2.12) resulta:

$$u = -\left(\frac{1}{j\omega\rho}\right) \left[\frac{\partial P(x)}{\partial x}\right] e^{j\omega t} \quad (2.14)$$

Usando otra vez (2.13) se obtiene:

$$u = -\left(\frac{1}{j\omega\rho}\right)\left[\frac{\partial P(x,t)}{\partial x}\right] \quad (2.15)$$

Mediante las condiciones frontera (2.10) y (2.11) resulta:

$$A_1 + B_1 = A_2 \quad (2.16)$$

$$\frac{A_1}{\rho_1 c_1} - \frac{B_1}{\rho_1 c_1} = \frac{A_2}{\rho_2 c_2} \quad (2.17)$$

Operando con (2.16) y (2.17) se tiene:

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (2.18)$$

Se define el coeficiente de reflexión r , como el cociente entre las amplitudes de la onda de presión reflejada y la onda de presión incidente:

$$r = \left(\frac{P_r}{P_i}\right)\bigg|_{x=0} = \frac{B_1}{A_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (2.19)$$

También se puede definir en función de la impedancia acústica característica del medio ($Z = \rho c$), resultando:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.20)$$

2.2.6. Absorción acústica.

La absorción acústica se define como la transformación de la energía asociada a la onda sonora incidente en otra forma de energía (generalmente calor en su mayor porcentaje).

Cuando una onda acústica incide sobre un material, parte de la energía asociada a la onda sonora (E_i) es reflejada (E_r), otra parte es absorbida convirtiéndose en energía calorífica en el material (E_a) y la parte restante traspasa el material (E_t), cumpliéndose que $E_i = E_r + E_a + E_t$. El nivel de energía convertido en energía calorífica depende de las propiedades absorbentes de sonido del material. La Figura 2.4 ilustra estos conceptos.

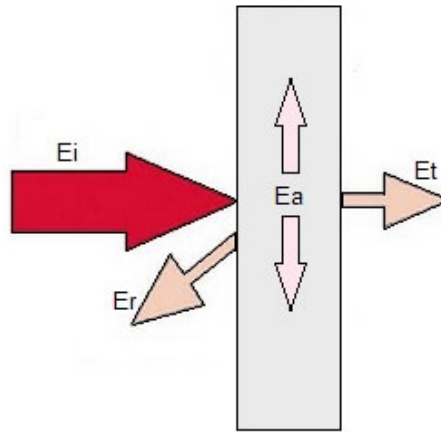


Figura 2.4 Absorción del sonido.

Las propiedades absorbentes de sonido de un material se expresan mediante el coeficiente de absorción acústica, α (alfa), en función de la frecuencia. El coeficiente de absorción acústica es el cociente entre la energía sonora absorbida y la energía sonora incidente. Es adimensional y sus valores oscilan entre 0 (reflexión total) y 1 (absorción total).

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (2.21)$$

El coeficiente de absorción acústica de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del ángulo con que incide la onda sobre la superficie.

2.2.7. Impedancia acústica específica.

La impedancia acústica, cuyo símbolo es Z , es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este. La impedancia acústica de un medio acústico en una superficie dada, y para un frente de onda, es el cociente complejo entre la presión acústica (p) sobre dicha superficie y el flujo de volumen acústico (U) que pasa por ella. La unidad de la impedancia acústica es $P_a \cdot s / m^3$.

$$Z = \frac{p}{U} \quad (2.22)$$

La impedancia acústica es una función que varía con la frecuencia. La impedancia acústica a una frecuencia en particular indica cuánta presión es generada por la onda acústica de esa frecuencia.

La impedancia acústica específica Z , es el cociente complejo entre la presión acústica (p) en un punto de un medio y la velocidad de desplazamiento (u) de las partículas. Es una propiedad característica del medio y del tipo de onda que es propagada.

$$Z = \frac{p}{u} = \rho_0 c \quad (2.23)$$

siendo $\rho_0 c$, la impedancia característica del medio.

En general Z es compleja:

$$Z = R + Xj$$

donde R es la resistencia acústica específica y X la reactancia acústica específica.

2.2.8. Función de transferencia.

Una función de transferencia es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación. La función de transferencia de un sistema lineal e invariante en el tiempo, se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de que las condiciones iniciales son nulas.

El método de medición de la norma UNE-EN ISO 10534-2 se basa en el hecho de que el coeficiente de reflexión acústica para incidencia normal r , puede determinarse a partir de la función de transferencia compleja H_{12} entre dos posiciones de micrófono frente al material ensayado, concretamente, entre la posición de micrófono 1 y 2.

La presión acústica compleja p es la transformada de Fourier de la expresión temporal de la presión acústica. Las presiones acústicas de la onda incidente p_I y reflejada p_R son, respectivamente:

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \quad (2.24)$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x} \quad (2.25)$$

donde

\hat{p}_I y \hat{p}_R , son los módulos de p_I y p_R en el plano de referencia ($x = 0$);

$k_0 = k_0' - jk_0''$, es el número de onda complejo.

Las presiones acústicas p_1 y p_2 en las dos posiciones de micrófono son:

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1} \quad (2.26)$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2} \quad (2.27)$$

siendo

x_1 , la distancia de la muestra a la posición de micrófono 1;

x_2 , la distancia de la muestra a la posición de micrófono 2.

La función de transferencia para la onda incidente solamente H_I es:

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0(x_1 - x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (2.28)$$

donde $s = x_1 - x_2$ es la separación entre los dos micrófonos.

La función de transferencia para la onda reflejada solamente H_R es:

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1 - x_2)} = e^{jk_0 s} \quad (2.29)$$

La función de transferencia H_{12} para el campo acústico total puede obtenerse

ahora usando las ecuaciones (2.26) y (2.27), teniendo en cuenta que $\hat{p}_R = r \hat{p}_I$:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} = H_r + jH_i \quad (2.30)$$

donde

H_r , es la parte real de H_{12} ;

H_i , es la parte imaginaria de H_{12} .

En la ecuación (2.30) se relaciona la función de transferencia H_{12} entre los dos micrófonos y el coeficiente de reflexión r . De esta ecuación se despejará r , a partir del cual se calculará el coeficiente de absorción acústica α .

Por otra parte, la función de transferencia acústica compleja puede definirse de tres maneras:

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = H_r + jH_i \quad (2.31)$$

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} = H_r + jH_i \quad (2.32)$$

$$H_{12} = \left[\frac{S_{12}}{S_{11}} \cdot \frac{S_{22}}{S_{21}} \right]^{1/2} = H_r + jH_i \quad (2.33)$$

siendo

S_{11} , Autoespectro: producto $p_1 \cdot p_1^*$ determinado a partir de la presión acústica compleja p_1 en la posición de micrófono 1.

S_{22} , Autoespectro: producto $p_2 \cdot p_2^*$ determinado a partir de la presión acústica compleja p_2 en la posición de micrófono 2.

S_{12} , Espectro cruzado: producto $p_2 \cdot p_1^*$ determinado a partir de las presiones acústicas complejas p_1 y p_2 en dos posiciones de micrófono.

S_{21} , Espectro cruzado: producto $p_1 \cdot p_2^*$ determinado a partir de las presiones acústicas complejas p_1 y p_2 en dos posiciones de micrófono.

* Significa complejo conjugado.

Normalmente se usa la ecuación (2.31). Se recomienda la ecuación (2.32) para casos en que hay ruido en la entrada y la ecuación (2.33) para casos en que hay ruido tanto en la entrada como la salida.

2.3. Método de ensayo según UNE-EN ISO 10534-2:2002.

En este apartado se describen los aspectos de la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”* que están vinculados al método de ensayo y a la instrumentación empleados en el presente trabajo.

2.3.1. Fundamentos del método.

El tubo de impedancia debe ser recto, rígido, liso y estanco. La muestra de ensayo se coloca en uno extremo del tubo y en el otro extremo se sitúa el altavoz. Se generan ondas planas en el interior del tubo utilizando una señal de excitación aleatoria o pseudo-aleatoria y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal y la impedancia normalizada del material bajo estudio. Las magnitudes se determinan como funciones de la frecuencia con una resolución en frecuencia condicionada por el equipo de medida.

Existen dos técnicas para realizar las mediciones:

- 1) Método de los dos micrófonos (usando dos micrófonos en posiciones fijas).
- 2) Método de un micrófono (usando un micrófono sucesivamente en dos posiciones).

Para el método de los dos micrófonos se necesita un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias de amplitud y fase entre los canales de entrada de los dos micrófonos. Se trata de un método que combina rapidez, gran precisión y sencillez de implementación. Es el método que se empleó en este trabajo.

El método de un micrófono requiere generación y procesamiento particulares por lo que puede implicar más tiempo, sin embargo, elimina las diferencias de fase entre los dos canales del sistema de medida y permite un posicionado óptimo a cualquier frecuencia.

2.3.2. Requisitos de la instrumentación.

La instrumentación de ensayo está constituida por un tubo de impedancia con un portamuestras en uno de sus extremos y una fuente sonora en el otro extremo. Normalmente, hay dos o tres espacios para micrófonos y se encuentran situados a lo largo de la pared del tubo.

2.3.2.1. Tubo de impedancia.

El tubo de impedancia debe ser rectilíneo, de sección recta constante y con paredes rígidas, lisas y no porosas, sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo. Las paredes deben ser suficientemente pesadas y macizas para que no entre en vibración por acción de las señales acústicas y no presente resonancias de vibración en el intervalo de frecuencia útil del tubo. En el caso de paredes metálicas, es recomendable que su espesor sea aproximadamente el 5 % del diámetro para tubos circulares. El tubo debe ser suficientemente largo para permitir el desarrollo de ondas planas entre la fuente y la muestra. Se recomienda que la sección transversal del tubo sea circular o rectangular. Es importante que el tubo se encuentre aislado de ruido y vibraciones externas.

El portamuestras puede formar parte integrante del tubo de impedancia o ser un elemento separado que se fija fuertemente al tubo durante las mediciones. En el caso de ser un elemento separado, su forma interior y sus dimensiones deben adaptarse a las del tubo de impedancia, dando lugar a un montaje hermético. La placa posterior del portamuestras debe ser rígida y fijada fuerte y herméticamente al tubo porque ella sirve de extremidad rígida para numerosas mediciones.

2.3.2.2. Altavoz.

El altavoz de membrana debe montarse en la terminación del tubo de impedancia del lado opuesto al portamuestras. La superficie de la membrana del altavoz debe cubrir, como mínimo, 2/3 partes del área de la sección transversal del tubo de impedancia. Puede situarse coaxial con el eje del tubo, o inclinado, o conectado al tubo por un codo. Tiene que estar aislado del tal forma que se eviten transmisiones por vía aérea por los flancos a los micrófonos. En la unión entre tubo y

montaje del altavoz debe aplicarse un aislamiento vibratorio mediante un material elástico, con el fin de evitar la excitación acústica del tubo por vía sólida. La parte interior del tubo cerca del altavoz, tiene que estar revestida con un material acústico absorbente eficaz para suprimir resonancias del tubo provocadas por la columna de aire.

2.3.2.3. Micrófonos.

Se deben usar micrófonos de idénticos tipos en cada posición. Para montajes en las paredes, se recomienda usar micrófonos de presión con un diámetro pequeño comparado con el valor de la relación c_0 / f_u (siendo c_0 la velocidad del sonido y f_u la frecuencia superior de trabajo). Además, es recomendable que los diámetros sean inferiores al 20 % de la distancia entre ellos.

Los micrófonos no se deben situar en cualquier zona a lo largo del tubo de impedancia, sino que hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones para poder determinar la zona de medida adecuada:

- Es fundamental que los micrófonos se sitúen en el campo de ondas planas.
- Además de ondas planas, el altavoz produce generalmente ondas no planas que desaparecen al cabo de una distancia aproximadamente igual a tres veces el diámetro del tubo. Por lo tanto, se recomienda que los micrófonos no se sitúen más cerca de la fuente que la sugerencia anterior, pero en cualquier caso, no más cerca que el valor de un diámetro.
- Las muestras de ensayo también causan distorsiones del campo acústico, por lo que se recomienda que la distancia mínima entre el micrófono y la muestra, dependiendo del tipo de muestra, sea: $\frac{1}{2} d$ (d es el diámetro interior del tubo) para muestras sin elementos de estructura y $2 d$ para muestras fuertemente asimétricas.

En cuanto al posicionamiento de los micrófonos en las paredes, se deben situar de tal forma que el diafragma coincida con la superficie interior del tubo y con un sellamiento entre el micrófono y el orificio de montaje. A menudo es necesario un pequeño retranqueo que debe ser idéntico para ambos montajes de los micrófonos. En el caso de usar micrófonos de ventilación lateral, es decir, aquellos que tienen el

orificio de ecualización de la presión situado en el lateral, es importante que dicho orificio no quede bloqueado por el montaje del micrófono.

2.3.2.4. Instrumentación utilizada para el procesado de las señales.

La instrumentación utilizada para procesar las señales debe estar formada por un generador de señal, un amplificador y un analizador de espectro de doble canal que opere aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT). Se requiere que el sistema mida la presión acústica en dos posiciones de micrófono y calcule la función de transferencia H_{12} entre ellas. El margen dinámico del analizador debería ser superior a 65 dB.

El generador de señal debe poder generar una señal estacionaria con densidad espectral plana en el rango de frecuencias de interés. La señal de excitación será aleatoria, pseudo-aleatoria o pseudo-aleatoria periódica, según sea necesario.

2.3.3. Intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia.

El intervalo de frecuencia de trabajo es:

$$f_l < f < f_u$$

donde

f_l , es la frecuencia de trabajo más baja del tubo, limitada por la resolución del equipo de procesado de señal;

f , es la frecuencia de trabajo;

f_u , es la frecuencia de trabajo más alta del tubo para evitar que se produzca propagación de ondas no planas.

En tubos de sección circular, f_u tiene que cumplir:

$$d < 0,58\lambda_u ; f_u \cdot d < 0,58c_o \quad (2.34)$$

donde

d , es el diámetro interior del tubo de impedancia expresado en metros;

f_u , se expresa en hercios;

c_o , es la velocidad del sonido en metros por segundo y se calcula:

$$c_o = 343,2\sqrt{T / 293} \quad (2.35)$$

donde T es la temperatura en Kelvins.

En cuanto a la distancia entre los micrófonos s , en metros, debe cumplir:

$$f_u \cdot s < 0,45c_o \quad (2.36)$$

La frecuencia límite inferior f_l depende, además de la resolución del sistema de análisis, de la distancia entre los micrófonos s que, como regla general, s debe exceder el 5 % de la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés, supuesto que s satisfaga los requisitos de la ecuación (2.36). Una mayor distancia entre los micrófonos aumenta la precisión de las mediciones.

En resumen, el diámetro del tubo limita la alta frecuencia puesto que éste debe ser menor que la longitud de onda para asegurar propagación de ondas planas. Además, la distancia entre micrófonos limita la baja frecuencia (debe haber cambios de fase entre los micrófonos) y la alta frecuencia (la distancia de separación debe ser inferior a media longitud de onda aproximadamente, según indica la ecuación (2.36)).

2.3.4. Procedimiento de ensayo.

El procedimiento de ensayo no solo incluye el proceso de medida, sino que también abarca otras tareas como el conexionado de la instrumentación, las mediciones de control, el montaje de la muestra de ensayo, etc.

2.3.4.1. Conexionado de la instrumentación.

La instrumentación de ensayo debe conectarse entre sí, tal y como se indica en el diagrama de bloques de la Figura 2.5.

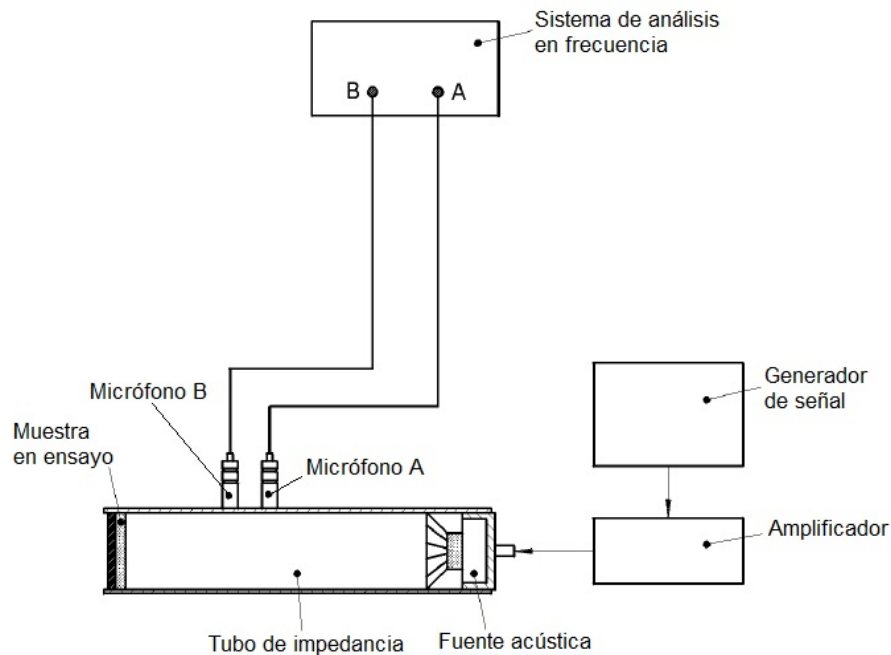


Figura 2.5 Diagrama de conexión de la instrumentación de ensayo.

2.3.4.2. Mediciones de control.

Previamente y con posterioridad a cada ensayo se deben realizar una serie de mediciones de control que consisten en:

Verificar la respuesta en amplitud del micrófono con una precisión de, al menos, $\pm 0,3 \text{ dB}$ respecto a una fuente acústica estable en todo el intervalo de frecuencia de trabajo. Verificar el sistema en una sola frecuencia, utilizando por ejemplo un pistófono, puede ser suficiente si se sabe que la respuesta del micrófono es lineal en todo el intervalo de frecuencia de trabajo.

Medir la temperatura del aire en el interior del tubo mediante un instrumento con una precisión de al menos $\pm 0,5$ grados Kelvin. El altavoz debe ponerse en funcionamiento al menos 10 minutos antes de cada ensayo para permitir que la temperatura se estabilice. La temperatura debe mantenerse constante durante la medición con tolerancias de $\pm 1 \text{ K}$. Además, se debe medir la presión atmosférica con una tolerancia de $\pm 0,5 \text{ kPa}$.

Previamente a cada ensayo, se debe medir el espectro de presión acústica en cada posición con la fuente acústica funcionando y parada para calcular la relación señal-ruido. El espectro de la fuente acústica debe ser, al menos, 10 dB mayor al del

ruido de fondo en todas las frecuencias de interés. En caso de que alguna frecuencia no lo cumpla, debe ser indicado en el informe.

Además de las mediciones de control antes y después de cada ensayo, la norma también hace referencia a calibraciones periódicas relacionadas con la atenuación en el tubo y la determinación del centro acústico de los micrófonos. El efecto principal de la atenuación es un incremento monótono de las amplitudes de los mínimos de presión acústica al aumentar la distancia desde la superficie de reflexión. Normalmente, este efecto no influye en los resultados obtenidos usando los métodos dados en esta parte de la norma. No obstante, cuando la distancia desde la superficie de la muestra en ensayo al micrófono más cercano es mayor que tres veces el diámetro, deben aplicarse correcciones por pérdidas en la evaluación de las magnitudes que se determinan de acuerdo a esta parte de la Norma UNE-EN ISO 10534. Puesto que las dimensiones del tubo de ensayo empleado no cumplen esta indicación, en el presente trabajo no se tuvo en cuenta la constante de atenuación k_0'' (véase apartado 2.2.1. “*Longitud de onda y número de onda*”) en los cálculos teóricos. En cuanto a la determinación del centro acústico de los micrófonos montados en la pared, no han sido validados hasta el momento procedimientos de calibración del centro acústico, por lo que los errores debidos a este factor deben considerarse como parte de la incertidumbre asociada al método.

2.3.4.3. Montaje de la muestra de ensayo.

La muestra debe ajustarse bien al portamuestras. Sin embargo, no debe quedar comprimida ni ajustada tan firmemente que quede abombada. Se recomienda sellar los intersticios con vaselina o cera si fuera necesario. La cara anterior de las muestras planas debe montarse en un plano normal al eje del tubo. Conviene ensayar dos muestras, más de dos si las muestras no son uniformes, en series repetidas usando las mismas condiciones de montaje.

2.3.4.4. Corrección por desajuste entre los canales de entrada de los micrófonos.

Cuando se usa la técnica de los dos micrófonos existe un desajuste de amplitud y fase entre los canales de entrada de los dos micrófonos que debe ser corregido. Para minimizar las diferencias de amplitud y fase entre los dos canales existen dos procedimientos.

Uno de los procedimientos consiste en la medición repetida con los micrófonos intercambiados. La corrección para el desajuste entre los canales de los micrófonos se hace intercambiando los canales para cada medición sobre una muestra de ensayo. Destacar que un canal se compone del micrófono, el preamplificador y el canal de procesado y análisis de la señal. Puede preferirse este procedimiento cuando se ensaya un número corto de muestras.

El otro procedimiento emplea un factor de calibración predeterminado. Se trata de un procedimiento de calibración que emplea una muestra de calibración especial y la corrección es válida para todas las mediciones sucesivas. Puede preferirse este procedimiento para ensayos de series de muestras puesto que después de la calibración los micrófonos permanecen montados. En el presente trabajo la corrección por desajuste entre los dos canales se llevó a cabo empleando el procedimiento del factor de calibración predeterminado puesto que es el más apropiado cuando se ensayan muchas muestras. Por tanto, solo se va a describir este procedimiento.

El procedimiento para determinar el factor de calibración predeterminado consiste en colocar una muestra absorbente en el tubo para evitar reflexiones acústicas importantes y medir la función de transferencia con dos configuraciones de los micrófonos. En primer lugar, se colocan los micrófonos en la configuración I (configuración estándar, véase la Figura 2.6) y se mide la función de transferencia H_{12}^I (el subíndice de H se refiere a la dirección en que se mide la función de transferencia, en este caso de la posición 1 a la posición 2).

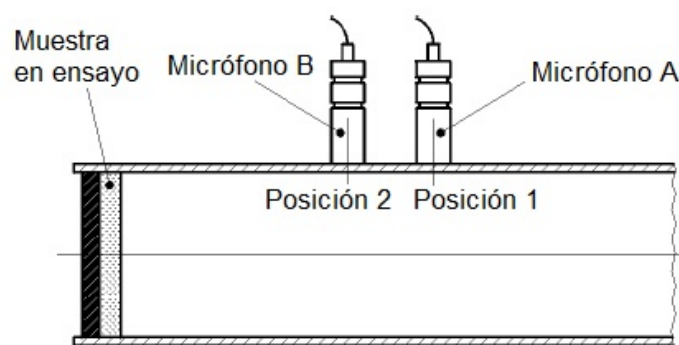


Figura 2.6 Configuración I (configuración estándar).

A continuación, se intercambian los micrófonos de posición (configuración II, véase la Figura 2.7) y se mide la función de transferencia H_{12}^{II} .

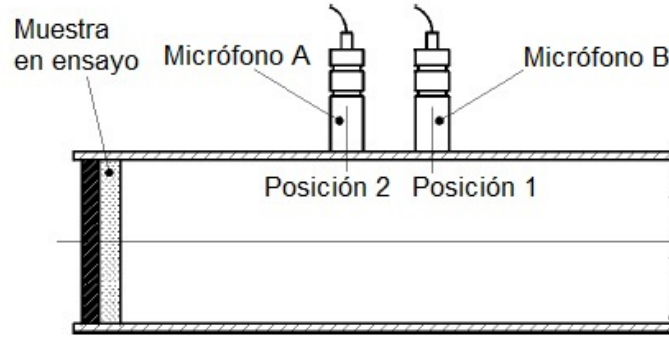


Figura 2.7 Configuración II (configuración con los micrófonos intercambiados).

Cuando se intercambian los micrófonos, hay que asegurarse que el micrófono A en la configuración II ocupa la posición precisa que ocupaba el micrófono B en la configuración I, y viceversa. Para llevar a cabo el intercambio no se desconectan las conexiones de los micrófonos al preamplificador y analizador de señal.

A partir de H_{12}^I y H_{12}^II se calcula el factor de calibración H_c usando la ecuación:

$$H_c = (H_{12}^I / H_{12}^II)^{1/2} \quad (2.37)$$

En caso de que el analizador solo sea capaz de medir funciones de transferencia en una dirección (por ejemplo del micrófono A al micrófono B), H_c puede calcularse utilizando la ecuación:

$$H_c = (H_{12}^I \cdot H_{21}^II)^{1/2} \quad (2.38)$$

Para llevar a cabo los ensayos de interés, se colocan los micrófonos en la configuración I, se inserta la muestra de ensayo objeto de estudio y se mide la función de transferencia sin corregir \hat{H}_{12} cumpliendo los requisitos de la técnica de medida empleada. Por último, el desajuste entre los dos canales se corrige con la ecuación:

$$H_{12} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (2.39)$$

donde H_{12} es la función de transferencia corregida que se empleará para determinar los parámetros acústicos del material bajo ensayo.

2.3.4.5. Determinación de los parámetros acústicos.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la función de transferencia acústica compleja se usa para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal, la impedancia normalizada y la admitancia normalizada del material bajo estudio.

La expresión del coeficiente de reflexión a incidencia normal se obtiene despejando r de la ecuación (2.30) y usando las ecuaciones (2.28) y (2.29), resultando:

$$r = |r|e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (2.40)$$

donde

ϕ_r , es el ángulo de fase del coeficiente de reflexión a incidencia normal;

r_r , es la componente real;

r_i , es la componente imaginaria;

x_1 , es la distancia entre la muestra y la posición 1 de micrófono;

k_0 , es el número de onda de campo libre, definido en la ecuación (2.2);

H_I , es la función de transferencia para la onda incidente solamente, definida en la ecuación (2.28);

H_R , es la función de transferencia para la onda reflejada solamente, definida en la ecuación (2.29).

El coeficiente de absorción acústica a incidencia normal se obtiene a partir del coeficiente de reflexión aplicando la ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (2.41)$$

Se recuerda que para materiales de reacción local, se pueden estimar los coeficientes de absorción para incidencia difusa a partir de los resultados de ensayo

obtenidos por este método de ensayo (véase ANEXO F de la norma UNE-EN ISO 10534-2).

La impedancia acústica específica se calcula:

$$Z / \rho c_o = R / \rho c_o + jX / \rho c_o = (1 + r) / (1 - r) \quad (2.42)$$

donde

R , es la componente real;

X , es la componente imaginaria;

ρc_o , es la impedancia característica, siendo ρ la densidad del aire:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_a T_0}{p_o T} \quad (2.43)$$

donde

T , la temperatura, en Kelvins;

p_a , la presión atmosférica, en kilopascales;

$T_0 = 293 \text{ K}$;

$p_o = 101,325 \text{ kPa}$;

$\rho_0 = 1,186 \text{ kg} / \text{m}^3$.

Por último, la admitancia acústica específica es la inversa de la impedancia acústica específica, por lo tanto:

$$G \rho c_o = g \rho c_o - jb \rho c_o = \rho c_o / Z \quad (2.44)$$

donde

g , es la componente real;

b , es la componente imaginaria.

2.4. Aplicación práctica del método de ensayo.

Este apartado se centra en la aplicación práctica del método de ensayo descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2. Para ello, se describen aspectos como el entorno de medida, la instrumentación empleada, los materiales bajo estudio, el procedimiento de ensayo, etc.

2.4.1. Entorno de medida.

Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM, ETSIST (anteriormente EUIT de Telecomunicación), concretamente en el laboratorio de Acústica situado en la planta baja del bloque VIII. El laboratorio de Acústica es un recinto sin fuentes importantes de ruido y con poco tránsito de personas, por lo que el nivel de ruido de fondo se puede considerar despreciable comparado con el nivel de señal que se emplea. En cuanto a las condiciones ambientales, se trata de un lugar donde no se producen grandes variaciones, lo cual es aconsejable. Por tanto, se puede concluir que es un entorno adecuado para llevar a cabo los ensayos.

2.4.2. Instrumentación empleada.

La Tabla 2.1 muestra la instrumentación que se empleó para realizar los ensayos de medida del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia, mediante el método de la función de transferencia.

Instrumentación	Marca	Modelo	Nº de serie
Tubo de impedancia ACUPRO	Spectronics		
Altavoz	JBL	2426H	P0061-041279
Micrófono A	G.R.A.S.	40AE	19701
Micrófono B	G.R.A.S.	40AE	17691
Preamplificador A	G.R.A.S.	26AK	11441
Preamplificador B	G.R.A.S.	26AK	11442
Sistema de análisis	01dB	Symphonie	00457
Amplificador de potencia	InterM	M700	010326305
Calibrador	Álava Ingenieros	Cal01	11565
Medidor de temperatura	VELOCICALC Plus	8386A	54120572
Taladro	BOSCH	PSB 650 RA	
Cúter			
PC			
Calibre			

Tabla 2.1 Instrumentación.

Los micrófonos son de campo libre, prepolarizados y de diámetro $\frac{1}{2}$ ".

El tubo de impedancia ACUPRO es metálico y de sección circular. A continuación, se detallan sus especificaciones técnicas:

- Longitud (l): 0,9 m (1,20 m incluyendo portamuestras).
- Diámetro exterior / interior (d): 0,0413 m / 0,0349 m .

- Espesor (e): 0,006 m .
- Peso: 10,5 kg .
- Adaptadores de micrófono: $\frac{1}{2}$ " (2).
- Distancia de la muestra al micrófono más cercano (L): 0,0509 m .
- Distancia entre micrófonos (s): 0,0286 m .
- Distancia de la muestra al micrófono más alejado (x_1): 0,0795 m .

En la Figura 2.8 se observa una instantánea del tubo de impedancia ACUPRO empleado en los ensayos con el portamuestras y los micrófonos montados.



Figura 2.8 Tubo de impedancia ACUPRO.

Además de la instrumentación mostrada en la Tabla 2.1, fue necesario el uso de varios software. A continuación, se enumeran los programas empleados en todo el proceso y la función que desempeñan:

- 1) SpectraPLUS: se utilizó para generar la señal de excitación;
- 2) dBFA: es un software de Symphonie encargado de medir la función de transferencia entre los dos micrófonos;

- 3) Software ACUPRO: es el software propio del tubo de impedancia y se encarga de determinar los parámetros acústicos de un material a partir de las funciones de transferencias medidas.

2.4.3. Comprobación de los requisitos de la instrumentación.

En el apartado 2.3.2. *“Requisitos de la instrumentación”* se han expuesto los requisitos y recomendaciones que, según la norma UNE-EN ISO 10534-2, debe cumplir la instrumentación empleada en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia. En este apartado se comprueba si el instrumental empleado, principalmente el tubo de impedancia, cumple dichos requisitos y recomendaciones.

Según la norma UNE-EN ISO 10534-2:

“Se recomienda que los tubos de impedancia metálicos de sección circular tengan un espesor de aproximadamente el 5 % del diámetro del tubo”. Puesto que el tubo tiene un diámetro de 3,49 cm y un espesor de 0,60 cm, el espesor es el 17,2 % del diámetro. Entendiendo que la recomendación se refiere a que el espesor debe ser como mínimo el 5 % del diámetro para que las paredes no entren en vibración por acción de las señales acústicas, se puede decir que se cumple la recomendación.

“Se recomienda que los micrófonos no se sitúen más cerca de la fuente que una distancia aproximadamente igual a tres veces el diámetro del tubo y en ningún caso más cerca que un diámetro”. Una distancia 3 veces el diámetro es 10,47 cm y la distancia desde el altavoz al primer micrófono con el que se encuentra el frente de ondas (posición 1 de micrófono) es aproximadamente 82 cm, mucho mayor que la distancia recomendada.

“Se recomienda que la distancia mínima entre el micrófono y la muestra sea $\frac{1}{2}$ diámetro para muestras sin elementos de estructura y 2 diámetros para muestras fuertemente asimétricas”. En este caso, la distancia de la muestra al micrófono más cercano es 5,09 cm, mientras que una distancia de $\frac{1}{2}$ diámetro es 1,75 cm y de 2 diámetros es 6,98 cm. Puesto que las muestras ensayadas en este trabajo no tienen elementos de estructura, sí se cumple la recomendación. Sin embargo, si se estudiaran muestras fuertemente asimétricas no se cumpliría la recomendación, por lo

que habría que tener cuidado con las posibles distorsiones del campo acústico generadas por la muestra de ensayo.

“Si se usan micrófonos montados en las paredes, se recomienda usar micrófonos de presión”. Sin embargo, en los ensayos se usaron micrófonos de campo libre.

“Cuando se usan micrófonos montados en las paredes, el diámetro de los micrófonos debe ser pequeño comparado con el valor de la relación c_0 / f_u ”. El diámetro de los micrófonos es $\frac{1}{2}$ ”, es decir, $1,27\text{ cm}$. Si se considera una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, el valor de c_0 (véase ecuación (2.35)) es $343,3\text{ m/s}$ y el valor de f_u (que se calcula en el apartado 2.4.4. “*Determinación del intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia*” de este trabajo) es aproximadamente 5400 Hz . Calculando c_0 / f_u se obtiene un valor aproximado de $6,4\text{ cm}$, el cual es superior al diámetro de los micrófonos, tal y como requiere la norma.

“Se recomienda además que los diámetros de los micrófonos sean inferiores al 20 % de la distancia entre ellos”. La distancia entre los micrófonos es $2,86\text{ cm}$ y el 20 % es $0,57\text{ cm}$. Puesto que el diámetro de los micrófonos es $1,27\text{ cm}$, no se cumple esta recomendación.

“El margen dinámico del analizador debería ser superior a 65 dB ”. En este caso el margen dinámico del analizador es de 70 dB .

Salvo alguna recomendación, la instrumentación cumple con lo establecido en la norma UNE-EN ISO 10534-2.

2.4.4. Determinación del intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia.

A continuación, se calcula el intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia ACUPRO, siguiendo las indicaciones de la norma que se encuentran detalladas en el apartado 2.3.3. “*Intervalo de frecuencia de trabajo*” del trabajo. Para los cálculos pertinentes, se supone un valor de temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el cálculo de la velocidad del sonido c_0 (véase ecuación (2.35)).

La frecuencia de trabajo más alta del tubo f_u está limitada para evitar que se propaguen ondas no planas en el interior del tubo y depende del diámetro del tubo de impedancia. Despejando f_u de la ecuación (2.34) se obtiene:

$$f_u < \frac{0,58 \cdot c_0}{d} \quad (2.45)$$

A partir de la ecuación (2.45) se calcula f_u :

$$f_u < \frac{0,58 \cdot 343,3}{0,0349} \approx 5700 Hz$$

Por lo tanto, por debajo de 5700 Hz se asegura la propagación de ondas planas a través del tubo.

Además, la distancia entre micrófonos s debe cumplir la condición de la ecuación (2.36), en la cual está incluida f_u . Puesto que la distancia entre micrófonos es fija en este tubo de impedancia, f_u depende de dicha distancia y debe cumplir la siguiente condición:

$$f_u < \frac{0,45 \cdot c_0}{s} \quad (2.46)$$

A partir de la ecuación (2.46) se obtiene el valor de f_u , limitado por la distancia entre los micrófonos:

$$f_u < \frac{0,45 \cdot 343,3}{0,0286} \approx 5400 Hz$$

Por lo tanto, a pesar de que el límite superior que asegura la propagación de ondas planas en el interior del tubo es 5700 Hz, la frecuencia de trabajo más alta del tubo está limitada por la distancia entre los micrófonos y es 5400 Hz.

La frecuencia de trabajo más baja del tubo f_l está limitada, además de por la resolución del sistema de análisis, por la distancia entre los micrófonos. Como regla general, la distancia entre micrófonos debería exceder en el 5 % la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés, es decir:

$$s > \frac{5}{100} \lambda_l ; s > \frac{5}{100} \cdot \frac{c_0}{f_l} \quad (2.47)$$

Se despeja f_l de la ecuación (2.47) resultando:

$$f_l > \frac{5}{100} \cdot \frac{c_0}{s} \quad (2.48)$$

De la ecuación (2.48) se obtiene la frecuencia de trabajo más baja del tubo:

$$f_l > \frac{5}{100} \cdot \frac{343,3}{0,0286} \approx 600 \text{ Hz}$$

En definitiva, el intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia abarca desde 600 Hz hasta 5400 Hz, suponiendo una temperatura de 20 °C. Es importante destacar que el intervalo de frecuencia depende de la temperatura, puesto que ésta condiciona el valor de c_0 , lo cual significa que el intervalo de frecuencia calculado puede variar levemente en función del valor de la temperatura, principalmente la frecuencia de límite superior f_u .

En este trabajo, los resultados del coeficiente de absorción se van a presentar en tercios de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz. Puesto que se midió la función de transferencia con una resolución en frecuencia de 25 Hz, los tercios de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz incluyen las frecuencias discretas desde 100 Hz hasta 5650 Hz (en el ANEXO A se detallan las frecuencias discretas incluidas en cada tercio de octava). Observando el intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia, se deduce que los tercios de octava desde 100 Hz hasta 500 Hz no cumplen los requisitos de la norma y que los tercios de octava de 630 Hz y 5000 Hz incluyen frecuencias fuera del intervalo. El hecho de que un tercio de octava no cumpla la norma no implica que el resultado sea erróneo, por lo que se puede presentar ese resultado siempre y cuando se indique en el informe esa no conformidad.

Como nota informativa, simplemente decir que tubos de impedancia con diámetros grandes son más precisos en bajas frecuencias, mientras que tubos con diámetros pequeños realizan medidas más precisas en altas frecuencias. Si se dispone de ambos tubos es posible presentar el coeficiente de absorción de un material combinando ambos resultados.

2.4.5. Procedimiento de ensayo.

Como ya se ha comentado anteriormente, la medida del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia se realizó empleando la técnica de medida de los dos micrófonos perteneciente al método de ensayo de la función de transferencia.

2.4.5.1. Montaje de la instrumentación.

El micrófono A se situó en la posición de micrófono 1 y se conectó al canal de entrada 1 del Symphonie, mientras que el micrófono B se situó en la posición de micrófono 2 y se conectó al canal de entrada 2 del Symphonie. En el PC se generó la señal de excitación utilizando el software SpectraPLUS y se midió la función de transferencia entre las dos posiciones de micrófono utilizando el software dBFA de Symphonie. La Figura 2.9 muestra el diagrama de montaje.

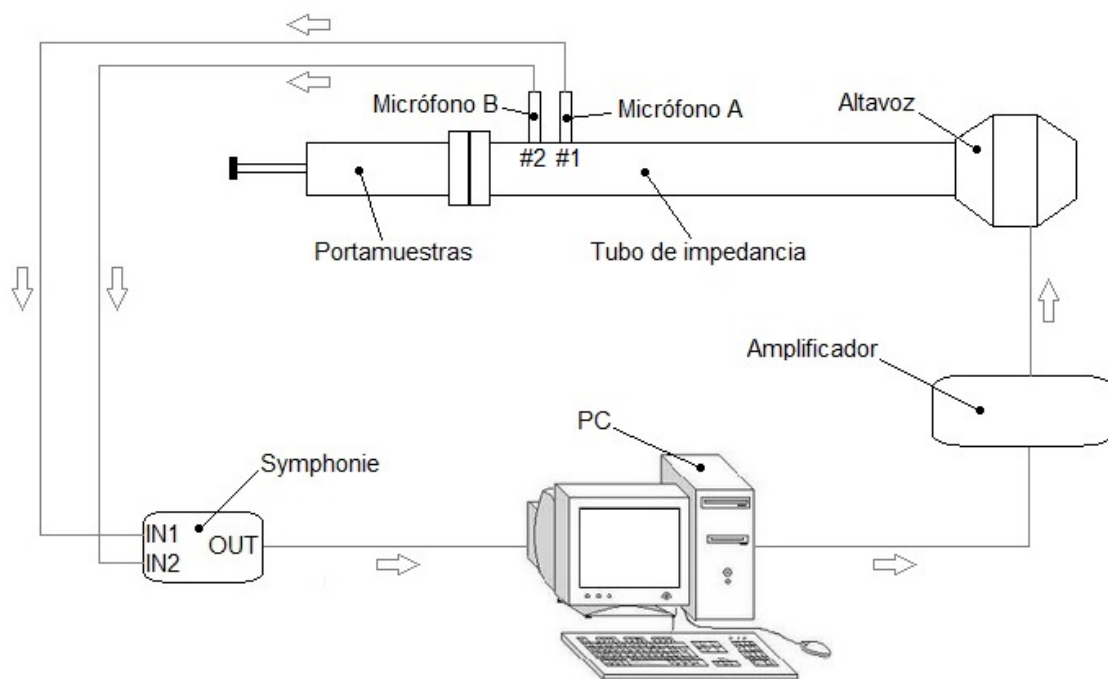


Figura 2.9 Diagrama de montaje.

Según la norma UNE-EN ISO 10534-2, cuando se usan micrófonos montados en la pared, cada micrófono debe montarse con el diafragma coincidiendo con la superficie interior del tubo. En la Figura 2.10 se muestra una instantánea de cómo debe colocarse el micrófono.



Figura 2.10 Colocación del micrófono.

2.4.5.2. Confección y colocación de la muestra de ensayo.

En la fase de confección de las muestras se debe tener mucho cuidado para evitar que un corte inadecuado las deteriore. Para cortar las muestras se utilizó un cúter proporcionado por ACUPRO, el cual se colocó en el portabrocas de un taladro situado en una estructura que facilita que el corte sea recto (véase Figura 2.11). Para no deteriorar las muestras se debe utilizar una baja velocidad de funcionamiento del taladro.



Figura 2.11 Equipamiento empleado en el proceso de confección de la muestra de ensayo.

En cuanto a la colocación de la muestra, ésta debe ajustarse bien al portamuestras. Sin embargo, no debe quedar comprimida para evitar que cambien sus propiedades intrínsecas. Una vez colocada la muestra, se debe ajustar la posición del pistón dentro del portamuestras, de manera que la cara de la muestra se encuentre nivelada correctamente con el borde del portamuestras. Una forma de asegurar que la posición del pistón es la adecuada, es utilizando un calibre para medir el espesor exacto de la muestra y ajustar la posición del pistón del portamuestras a esa medida [5]. Este proceso se muestra en la Figura 2.12.

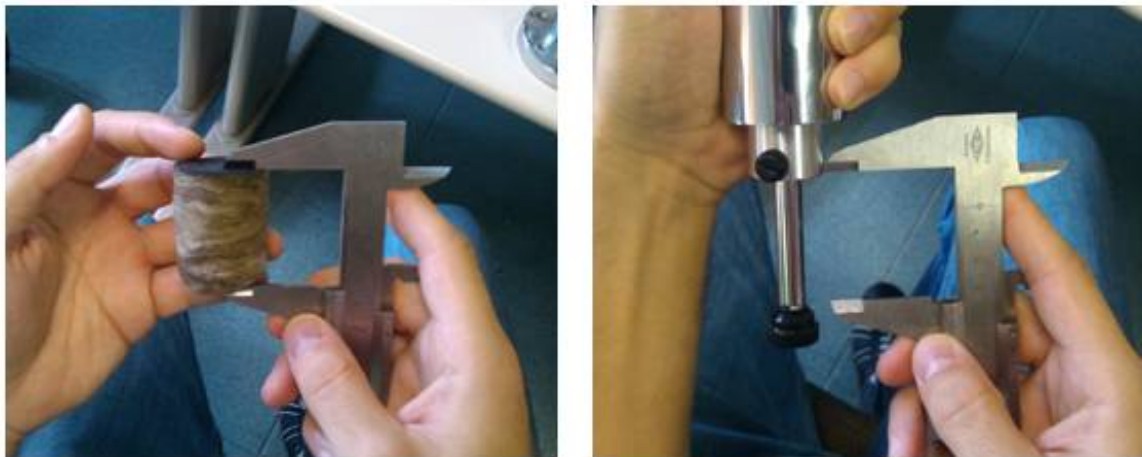


Figura 2.12 Proceso de colocación de la muestra de ensayo.

Los materiales que se emplearon para llevar a cabo los estudios de precisión expuestos en el capítulo 4 “*Precisión del método de ensayo*” son:

- 1) Lana de roca de 50 *mm* de espesor, con recubrimiento acústico negro en una de sus caras (cara enfrentada al altavoz). Fabricante: ROCKWOOL, modelo 231.652.
- 2) Lana mineral CLIMAVER NETO de 25 *mm* de espesor, con recubrimiento kraft / aluminio visto reforzado en una cara y recubrimiento acústico negro en la otra (cara enfrentada al altavoz). Fabricante: SAINT GOBAIN CRISTALERIA ISOVER ESPAÑA.

En la Figura 2.13 se puede ver una muestra de ensayo de lana de roca de 50 *mm* de espesor (imagen izquierda) y una muestra de ensayo de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 *mm* de espesor (imagen derecha).



Figura 2.13 Muestra de ensayo: lana de roca 50 *mm* ROCKWOOL (izquierda) y lana mineral CLIMAVER NETO 25 *mm* ISOVER (derecha).

2.4.5.3. Señal de excitación empleada.

Según especifica la norma, se puede generar una de las siguientes señales de excitación: aleatoria, pseudo-aleatoria o pseudo-aleatoria periódica, según se necesite. Para comprobar si es mejor utilizar una señal de excitación u otra, se midió el coeficiente de absorción acústica de la muestra de calibración (más información sobre la muestra de calibración en ANEXO B) utilizando como señales de excitación ruido blanco, ruido rosa y señal MLS. Tanto el ruido blanco como el ruido rosa son señales aleatorias mientras que la señal MLS es pseudo-aleatoria periódica.

Para medir el coeficiente de absorción con ruido rosa y ruido blanco el montaje de la instrumentación empleado fue el de la Figura 2.9. Sin embargo, para medir el coeficiente de absorción empleando señal MLS como señal de excitación, no fue posible llevar a cabo el ensayo con ese montaje ya que el software SpectraPLUS no genera señal MLS, por lo que se utilizó como generador de señal el software dBBati de Symphonie. El problema radica en que si se utiliza simultáneamente el dBBati para generar la señal MLS y el dBFA para medir la función de transferencia con el mismo Symphonie, el sistema de análisis se bloquea y no es posible realizar el ensayo. Por lo tanto, fue necesario añadir al montaje un portátil conectado a otro Symphonie, a partir del cual se generó la señal MLS con el software dBBati. El montaje empleado para realizar el ensayo con una señal de excitación MLS se muestra en la Figura 2.14.

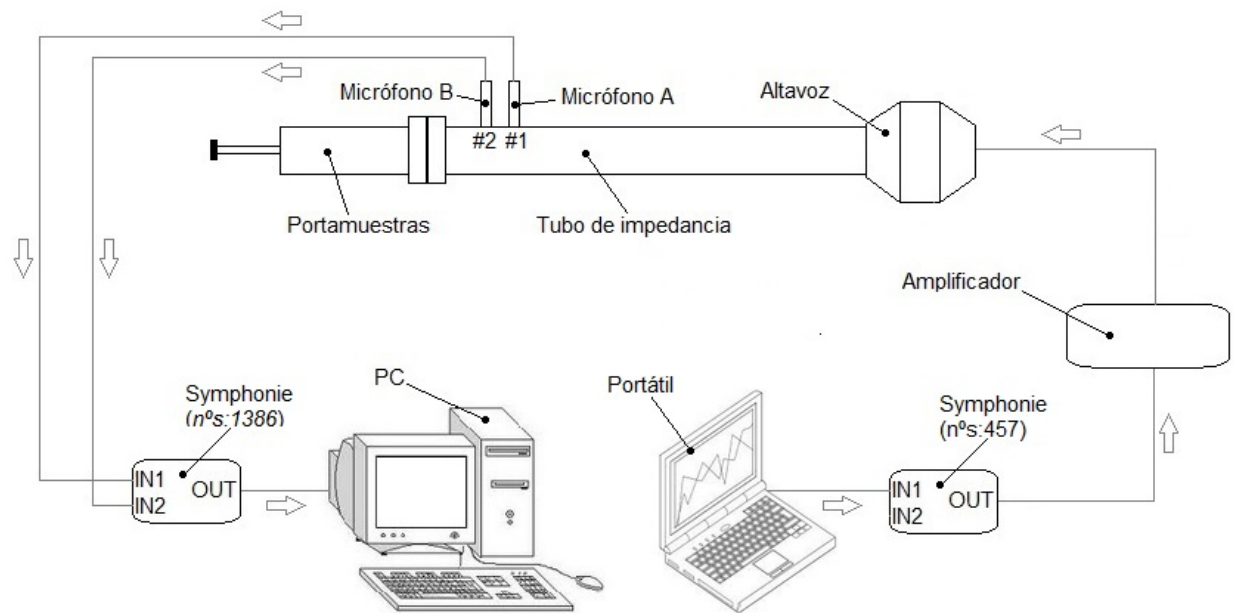


Figura 2.14 Diagrama de montaje para señal de excitación MLS.

En la Figura 2.15 se representan de forma gráfica los coeficientes de absorción acústica de la muestra de calibración en tercios de octava obtenidos con las tres señales de excitación.

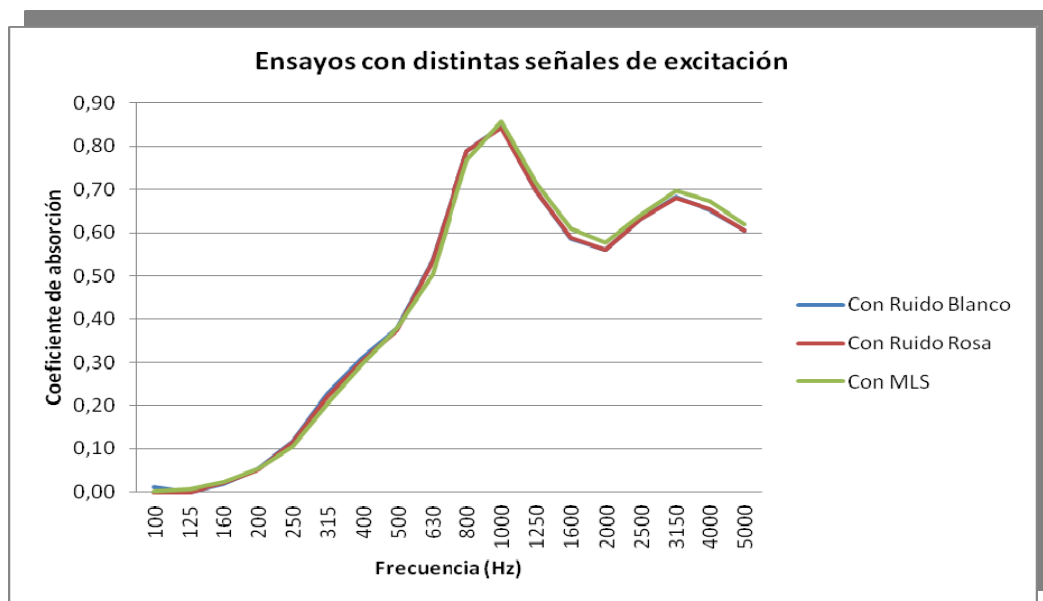


Figura 2.15 Coeficientes de absorción determinados con diferentes señales de excitación.

Se obtuvieron resultados idénticos con ruido blanco y ruido rosa, mientras que con MLS los resultados difirieron levemente, lo que implica, que la elección de cualquiera de las tres señales como señal de excitación sería válida. Por tanto, la

elección de la señal de excitación a emplear no se basó solamente en los resultados obtenidos, sino que se tuvieron en cuenta otros factores.

Por un lado, se descartó la señal MLS, ya que requiere un montaje más complejo debido al uso de dos ordenadores y dos sistemas de análisis Symphonie. Por otra parte, se decidió no utilizar ruido blanco ya que es una señal cuyo nivel aumenta 3 *dB* por octava, y en el caso de necesitar aumentar el nivel de la señal para cumplir la relación señal-ruido en las bandas de baja frecuencia, podría suceder que en las bandas de alta frecuencia el nivel fuera demasiado elevado, llegando a dañar el altavoz. En definitiva, se decidió no utilizar ruido blanco para prevenir posibles daños en el altavoz en alta frecuencia. Por consiguiente, se optó por emplear ruido rosa como señal de excitación para todos los ensayos realizados en el presente trabajo, puesto que se trata de una señal con el mismo nivel en todas las bandas de octava y el riesgo a dañar el altavoz es menor.

2.4.5.4. Medición de la función de transferencia.

Antes y después de la medición de la función de transferencia se realizaron las mediciones de control, tal y como exige la norma. Para corregir el desajuste entre los canales de entrada de los dos micrófonos, se empleó la técnica del factor de calibración predeterminado, descrita en el apartado 2.3.4.4. *“Corrección por desajuste entre los canales de entrada de los micrófonos”*. Para ello, se introdujo en el tubo la muestra de calibración especial que proporciona el fabricante (para más información sobre la muestra de calibración, véase ANEXO B) y se midió la función de transferencia con las dos configuraciones de micrófonos. Destacar que cada ensayo completo incluye el proceso de corrección por desajuste entre los canales de entrada.

Una vez colocada la muestra de ensayo objeto de estudio en el interior del tubo con los cuidados pertinentes, es conveniente esperar unos minutos antes de iniciar la medida de la función de transferencia. De esta forma el material se adapta a las condiciones ambientales del interior del tubo. La medida de la función de transferencia entre los dos micrófonos se realizó mediante el software dBFA de Symphonie con la siguiente configuración:

- Tamaño FFT: 1024.
- Solapamiento: 75 %.
- Tipo de ventana: Hanning

- Ancho de banda: 10000 Hz .
- Duración de la medida: 10000 ms .
- N° de promedios: 997.

Finalmente, se obtuvieron valores de la función de transferencia entre los dos micrófonos hasta 10000 Hz con una resolución en frecuencia de 25 Hz .

2.4.5.5. Determinación del coeficiente de absorción acústica.

Para determinar el coeficiente de absorción de la muestra de ensayo a partir de una medida de la función de transferencia, se utilizó el módulo de Caracterización Acústica de Materiales (*Acoustic Material Characterization*) del software ACUPRO propio del tubo de impedancia. El software ACUPRO es capaz de importar medidas procedentes de cualquier analizador, como por ejemplo, Symphonie y Harmonie de 01dB, o SoundBook de SINUS. El módulo de Caracterización Acústica de Materiales permite obtener el coeficiente de reflexión, el coeficiente de absorción acústica, la impedancia acústica específica y la admitancia acústica específica. En el proceso de cálculo, el software aplica las correcciones de fase y amplitud entre canales de entrada, así como la corrección de absorción latente del tubo [3]. El menú de configuración del módulo de Caracterización Acústica de Materiales se divide en tres bloques.

El primer bloque corresponde con la corrección del desajuste entre los dos canales de entrada mediante el procedimiento del factor de calibración predeterminado. Se introducen las funciones de transferencia H_{12}^I y H_{21}^{II} , correspondientes a las dos configuraciones de micrófonos, pulsando los botones “*Calibration File 1*” y “*Calibration File 2*”, respectivamente (véase Figura 2.16), y seleccionando los directorios donde se encuentran ambas funciones de transferencia. A continuación, se selecciona en que directorio se quiere guardar el archivo del factor de calibración H_c pulsando el botón “*Calibration Data File*” y, por último, se genera H_c pulsando el botón “*Perform Calibration*”. En el ANEXO C, se muestran los resultados obtenidos, mediante una hoja de cálculo Excel, del proceso de cálculo descrito en la norma y se comparan con los resultados obtenidos mediante el software ACUPRO. Con este estudio se demuestra que el software ACUPRO calcula internamente el factor de calibración H_c utilizando la ecuación (2.38), basándose en que el sistema de análisis Symphonie mide funciones de transferencia en una

dirección (del canal 1 al canal 2). Los valores de H_c que proporciona el software son el módulo y la fase (en grados).

En el segundo bloque se debe especificar, por un lado, la distancia entre la muestra de ensayo y el micrófono más cercano (L) y la distancia entre micrófonos (s) y, por otro lado, las condiciones ambientales durante la medición (temperatura y presión ambiental). La temperatura se utiliza para calcular la velocidad del sonido c_0 y la presión ambiental para calcular la densidad del aire ρ .

En el último bloque se introduce la función de transferencia \hat{H}_{12} , medida con la muestra de ensayo objeto de estudio en el interior del tubo, pulsando el botón “*Measurement Data File*” y seleccionando el directorio donde se encuentra dicha función de transferencia. Por último, pulsando el botón “*PERFORM CALCULATIONS*” el software corrige internamente la función de transferencia \hat{H}_{12} , empleando el factor de calibración H_c anteriormente calculado, y determina los parámetros acústicos de la muestra de ensayo objeto de estudio.

La Figura 2.16 muestra un ejemplo del menú de configuración del modulo anteriormente descrito.

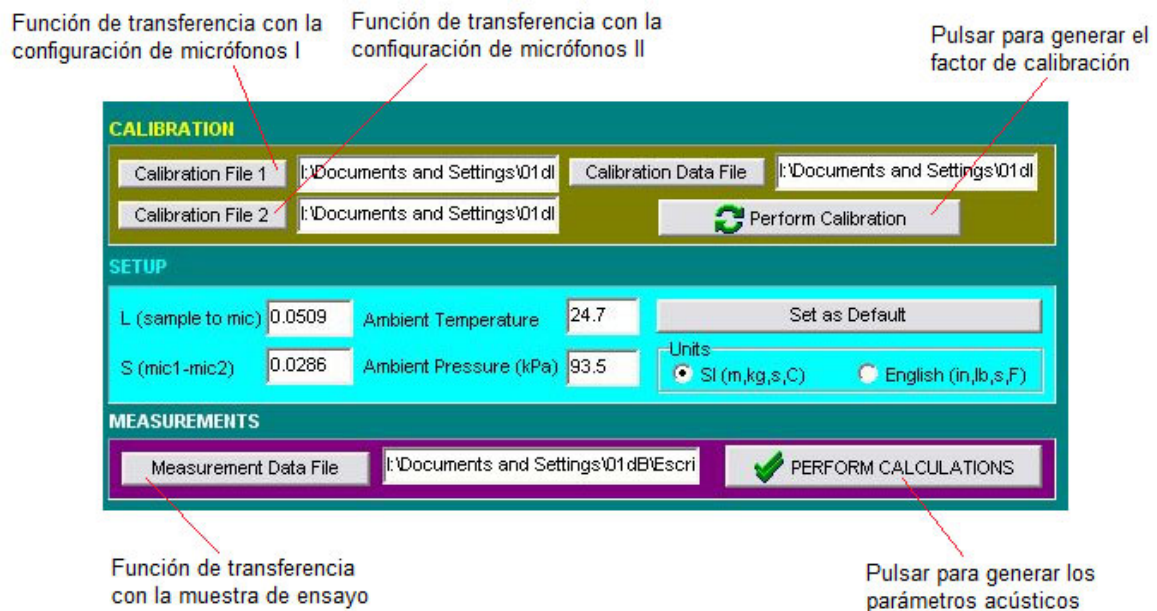


Figura 2.16 Configuración del software ACUPRO.

El software proporciona los valores de los parámetros acústicos con la misma resolución en frecuencia que tienen las funciones de transferencia medidas, en este

caso cada 25 Hz . Tal y como se observa en la Figura 2.17, el software Acupro presenta los valores de los parámetros acústicos de forma gráfica en la parte derecha de la ventana y numérica en la parte izquierda (*Output Window*). En la parte inferior de la ventana se hallan dos menús de opciones, uno para las gráficas y otro para los datos numéricos. Es en estos menús donde se selecciona el parámetro acústico que se quiere consultar.

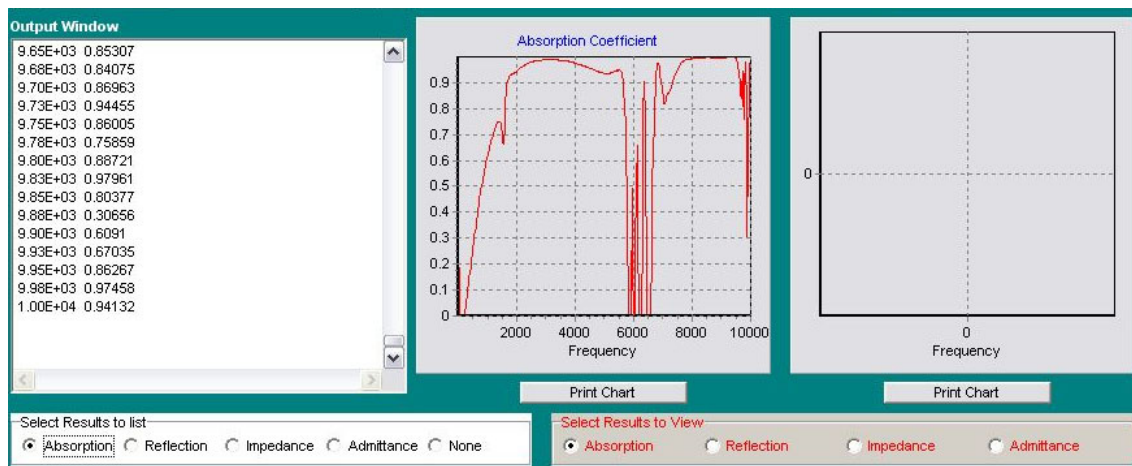


Figura 2.17 Visualización de los parámetros acústicos en el software ACUPRO.

Si se desea guardar una gráfica, basta con pulsar el botón “*Print Chart*” que se encuentra en la parte inferior de la gráfica. En cuanto a los datos numéricos que aparecen en la ventana “*Output Window*”, se pueden copiar y pegar en cualquier aplicación de Windows.

Es importante destacar que la norma UNE-EN ISO 10534-2 no especifica cómo deben presentarse los resultados obtenidos en un ensayo, si en frecuencias discretas, tercios de octavas u octavas. Esta carencia de la norma puede dificultar la comparación de resultados entre distintos laboratorios. En este trabajo se decidió presentar los resultados de cada ensayo en bandas de tercio de octava de 100 Hz a 5000 Hz , puesto que es la manera en que se presentan los resultados en la medida del coeficiente de absorción en cámara reverberante. En el ANEXO A se detalla el proceso de transformación del coeficiente de absorción de frecuencias discretas a tercios de octava.

Aunque el objetivo del ensayo es determinar el coeficiente de absorción acústica, en tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz , de los materiales bajo estudio, también se recopilaron el resto de parámetros acústicos para completar la información

sobre los materiales acústicos estudiados. Dicha información se encuentra en el ANEXO D.

2.4.6. Coeficiente de absorción determinado en los ensayos.

Tal y como se ha comentado anteriormente, los materiales empleados para llevar a cabo los estudios del presente trabajo fueron: lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y lana mineral CLIMAVER NETO de 25 *mm* de espesor de ISOVER. Ambos materiales fueron ensayados en el programa de intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1, organizado por la red de laboratorios de acústica ACUSTILAB que se ubica dentro de EUROLAB-España, en el cual participaron 9 laboratorios, uno de ellos la Escuela (ETSIST). Cada laboratorio debía realizar cuatro ensayos de cada material, por lo que se debían confeccionar cuatro muestras de ensayo de cada uno de los materiales. El valor medido que fue atribuido a cada participante se corresponde con la media aritmética de los cuatro coeficientes de absorción obtenidos en los ensayos. Finalmente se determinó el valor asignado de α conforme a un protocolo establecido. Se tomó este valor de consenso para el número de participantes no excluidos en cada magnitud como la medida de tendencia central más apropiada en función de la distribución de los datos de los participantes, una vez se verificó la normalidad de los mismos. Los resultados se presentaron en bandas de tercio de octava.

La Tabla 2.2 muestra los valores asignados en la intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 al coeficiente de absorción acústica del material de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y del material de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 *mm* de espesor de ISOVER. Por motivos de confidencialidad no se pueden presentar los valores medidos por la Escuela (laboratorio ETSIST), sin embargo, si se puede indicar que se detectaron las mayores diferencias respecto al valor asignado en los tercios de octava que se encuentran fuera del intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia empleado (según las exigencias de la UNE-EN ISO 10534-2, el intervalo abarca desde 600 *Hz* hasta 5400 *Hz*), donde el tubo es menos preciso, pudiendo ser ésta la causa principal de esas diferencias.

Frecuencia (Hz)	Lana de roca 50 mm ROCKWOOL	Lana mineral 25 mm ISOVER
100	0,08	0,02
125	0,10	0,03
160	0,17	0,05
200	0,23	0,07
250	0,32	0,11
315	0,41	0,15
400	0,57	0,20
500	0,71	0,27
630	0,79	0,36
800	0,84	0,52
1000	0,89	0,64
1250	0,91	0,75
1600	0,90	0,85
2000	0,90	0,92
2500	0,91	0,98
3150	0,94	0,98
4000	0,96	0,97
5000	0,97	0,95

Tabla 2.2 Valores asignados en la intercomparación al α del material de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL y del material de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 mm de ISOVER.

3

Evaluación de la incertidumbre de medida del ensayo

3.1. Concepto de incertidumbre.

El objetivo de una medición es determinar el valor del mensurando; esto es, el valor de la magnitud particular bajo medición. En general, el resultado de una medición es sólo una aproximación o estimación del valor del mensurando. Por este motivo, a la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de forma que se pueda evaluar su idoneidad [7]. Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Por lo tanto, surge la necesidad de establecer un procedimiento fácilmente comprensible y aceptado universalmente para caracterizar la calidad del resultado de una medición; es decir, para evaluar y expresar su incertidumbre. Para cubrir esta necesidad se publica la “*Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*” (GUM), en la cual se establecen las normas generales para la evaluación y la expresión de la incertidumbre de medida que pueden aplicarse en la mayoría de los campos de mediciones físicas.

Según la GUM, la *incertidumbre de medida* es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando. En su sentido más amplio, la incertidumbre de medida es la duda sobre la validez del resultado de una medición. El resultado de una medición únicamente se halla completo cuando está acompañado de una declaración acerca de la incertidumbre de dicho resultado. El valor de la incertidumbre establece el margen de variación del mensurando, que se denomina intervalo de cobertura, dentro del cual se encuentra el valor verdadero con una determinada probabilidad o nivel de confianza. El intervalo abarca desde $y - U$ a $y + U$, siendo y el valor del mensurando y U el valor de la incertidumbre de medida asociada al mensurando. El resultado de la medida se representa como $y \pm U$ unido a una declaración del factor de cobertura y el nivel de confianza.

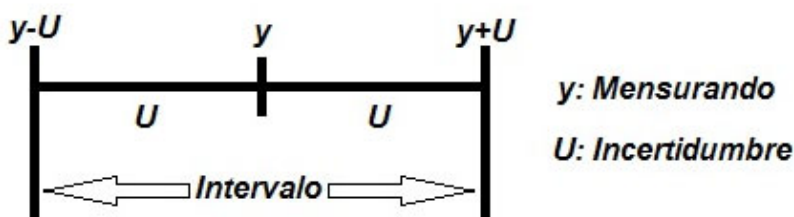


Figura 3.1 Mensurando y su incertidumbre asociada.

La incertidumbre de medida puede deberse a numerosos factores, entre ellos:

- la naturaleza de la magnitud que se mide,
- el instrumento de medición,
- el observador,
- las condiciones externas.

Cada uno de estos factores constituye por separado una fuente de incertidumbre y contribuyen en mayor o menor grado a la incertidumbre total de la medida. La tarea de detectar y evaluar las incertidumbres no es simple e implica conocer diversos aspectos de la medición.

La incertidumbre de medida comprende, en general, varias componentes. Estas componentes de incertidumbre se pueden clasificar en dos tipos (tipo A y tipo B), en función del método para estimar su valor numérico. Las componentes tipo A se evalúan a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones típicas experimentales, las cuales representan la dispersión de los resultados. Estas componentes de incertidumbre se reducen aumentando el número de mediciones. Cuando la dispersión de las medidas es pequeña se dice que la medida es precisa. Las componentes tipo B, que también pueden ser caracterizadas por desviaciones típicas, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones, como por ejemplo, la información proporcionada por los certificados de calibración de los equipos.

En ocasiones se confunden los términos “*error de medida*” e “*incertidumbre de medida*”, sin embargo, representan conceptos completamente diferentes. El error de medida es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero, siendo éste último el que se obtendría mediante una medición perfecta por lo que es por naturaleza indeterminado; mientras que la incertidumbre de medida es la cuantificación de la duda que se tiene sobre el resultado de la medición. La incertidumbre es una expresión del hecho de que, para un mensurando y un resultado de medida del mensurando dados, no existe un único valor, sino un infinito número de valores dispersos en torno al resultado, que son compatibles con todas las observaciones, datos y conocimientos que se poseen y que, con diferentes grados de credibilidad, pueden ser atribuidos al mensurando.

Por último, añadir que actualmente la “*Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*” (GUM) reconoce dos métodos para la evaluación de la incertidumbre:

- 1) El método clásico de la GUM (propagación de incertidumbres).
- 2) El método de Monte Carlo (propagación de distribuciones).

En este trabajo se evaluó la incertidumbre empleando el método de Monte Carlo. En los siguientes apartados se exponen los motivos por los cuales se utilizó el método de Monte Carlo y se detalla el procedimiento de cálculo de dicho método.

3.2. Propagación de distribuciones. Método de Monte Carlo.

3.2.1. Introducción.

Desde inicios de la pasada década, el Comité Adjunto para las Guías Metrológicas (JCGM), venía trabajando en una nueva alternativa al enfoque clásico para estimar la incertidumbre y, en septiembre del año 2006, publicó un borrador del suplemento 1 de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre GUM ISO 1995, titulado “*Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the Guide to the Expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*”, en el cual se detalla el método de Monte Carlo para la evaluación de la incertidumbre de medida. En septiembre de 2008 se publicó el documento final.

El Suplemento 1 de la “*Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*” (GUM) aborda la propagación de las distribuciones de probabilidad a partir de un modelo de cálculo basado en datos de medida, como base para la evaluación de la incertidumbre de medida mediante el método de Monte Carlo. Se trata de un enfoque numérico general, en consonancia con los principios de la GUM, para llevar a cabo los cálculos requeridos como parte de una evaluación de la incertidumbre de medida. Debe subrayarse que la ley de propagación de distribuciones cumple los principios generales en los cuales se basa la GUM. El tratamiento es aplicable a cualquier modelo con varias de magnitudes de entrada y una sola magnitud de salida.

El mencionado método de Monte Carlo es una técnica que engloba la generación de números aleatorios y el cálculo de probabilidad para resolver problemas. Se utiliza para la propagación de distribuciones llevando a cabo un

muestreo aleatorio de distribuciones de probabilidad. Es una alternativa práctica al enfoque clásico de la GUM para la evaluación de la incertidumbre, en situaciones en las que el enfoque clásico para el cálculo de la incertidumbre no es aplicable o su aplicación es dudosa. También puede utilizarse cuando sea difícil aplicar el enfoque clásico de la GUM para el cálculo de la incertidumbre, por ejemplo, debido a la complejidad del modelo.

El enfoque clásico de la GUM, simplifica el tratamiento de las magnitudes aleatorias de entrada, al uso de: el mejor valor asignado, las incertidumbres típicas, las covarianzas y los grados de libertad. El planteamiento considerado según el método de Monte Carlo es que utiliza la función de densidad de probabilidad (FDP) de cada magnitud de entrada como información básica y opera directamente con ellas para obtener la FDP de la magnitud de salida. Esta es la razón por la que se nombra este método como propagación de distribuciones. Se puede decir que la propagación de distribuciones tiene una aplicación más amplia que la del enfoque clásico de la GUM, ya que trabaja con información más completa que la proporcionada por la mejor estimación del valor asignado y la incertidumbre típica asociada a cada magnitud de entrada.

Mientras en el enfoque clásico de la GUM para la evaluación de la incertidumbre existen algunas limitaciones, en el caso de la propagación de distribuciones siempre se puede proporcionar una FDP para la magnitud de salida, coherente con el modelo de medición y las FDP de las magnitudes de entrada. La FDP para la magnitud de salida, muestra el completo conocimiento de dicha magnitud, basado en el conocimiento de las magnitudes de entrada descrito por las FDP que se les asignan. Una vez obtenida la FDP de la magnitud de salida, dicha magnitud puede representarse por su esperanza matemática, tomada como la mejor estimación del valor de la magnitud, y por la desviación típica, tomada como la incertidumbre típica asociada a la magnitud de salida. Además, a partir de la FDP se puede obtener, para una probabilidad de cobertura preestablecida, cualquier intervalo de cobertura requerido, incluyendo tanto el intervalo con probabilidad simétrica como el menor intervalo de cobertura para la magnitud de salida.

Los problemas típicos en la evaluación de la incertidumbre, en los que puede aplicarse el método de Monte Carlo, son aquellos donde:

- las contribuciones a la incertidumbre no son del mismo orden de magnitud,

- es difícil, o no conveniente, proporcionar las derivadas parciales del modelo, tal como requiere la ley de propagación de la incertidumbre,
- la FDP de la magnitud de salida no es una distribución normal o una distribución t ,
- la estimación de la magnitud de salida y su correspondiente incertidumbre típica asociada son, aproximadamente, del mismo orden de magnitud,
- los modelos son arbitrariamente complicados,
- las FDP de las magnitudes de entrada son asimétricas,

No obstante, el enfoque clásico de la GUM sobre la incertidumbre sigue siendo la principal opción para evaluar la incertidumbre en circunstancias en que pueda demostrarse su aplicación.

3.2.2. Fases principales de la evaluación de la incertidumbre.

Las fases principales de la evaluación de la incertidumbre son diseño del modelo, propagación y resumen:

Diseño del modelo:

- 1) definir la magnitud de salida Y , es decir, la magnitud a evaluar (mensurando);
- 2) determinar las magnitudes de entrada $X = (X_1, \dots, X_N)$ de las que depende la magnitud de salida Y ;
- 3) Desarrollar un modelo que relacione la magnitud de salida con las magnitudes de entrada;
- 4) En base a los conocimientos disponibles, asignar las funciones de densidad de probabilidad (FDP): gaussiana (normal), rectangular (uniforme), etc.; a las magnitudes de entrada.

Propagación: propagar las FDP de las magnitudes de entrada X_i a través del modelo para obtener la FDP de Y .

Resumen: utilizar la FDP de Y para obtener:

- 1) La esperanza matemática de Y , considerada como una estimación y del mejor valor asignado a la magnitud evaluada;
- 2) La desviación típica de Y , considerada como la incertidumbre típica $u(y)$ asociada a y ;
- 3) Un intervalo de cobertura que contenga Y con una probabilidad específica (nivel de confianza).

3.2.3. Propagación de distribuciones.

La fase de propagación de distribuciones se puede llevar a cabo de diferentes formas:

- 1) Métodos analíticos, es decir, métodos que proporcionan una representación matemática de la función de densidad de probabilidad (FDP) para Y . Resultan ideales ya que no introducen ninguna aproximación pero solo son aplicables en casos simples.
- 2) Propagación de incertidumbre basada en la sustitución del modelo por una aproximación basada en el desarrollo en serie de Taylor de primer orden (la ley de propagación de incertidumbres).
- 3) Como el 2) pero también teniendo en cuenta órdenes superiores en la aproximación a series de Taylor.
- 4) Métodos numéricos que implementan la propagación de distribuciones, especialmente los que utiliza el método de Monte Carlo.

En la fase de propagación se deberá seleccionar un método adecuado. Si se demuestra que se cumplen las condiciones necesarias para que el enfoque clásico de la GUM proporcione resultados válidos, dicho método puede utilizarse. Si hay indicaciones de que el enfoque clásico puede no ser válido, deberá emplearse otro procedimiento. Puede surgir una tercera situación en la que resulte difícil asegurar la validez del enfoque clásico de la GUM. En los tres casos, el método de Monte Carlo

proporciona un método alternativo y práctico. En el primer caso, el método de Monte Carlo puede llegar a ser más fácil de aplicar debido, por ejemplo, a las dificultades para calcular los coeficientes de sensibilidad. En el segundo caso, el método de Monte Carlo generalmente puede dar resultados válidos, ya que no realiza hipótesis de aproximación. En el tercer caso, puede aplicarse, bien para determinar directamente los resultados o bien para valorar la calidad de los proporcionados por el enfoque clásico de la GUM.

La propagación de las FDP g_x para las magnitudes de entrada mediante el modelo, proporciona la FDP g_y de la magnitud de salida Y , tal como se muestra en la Figura 3.2. Las FDP de las magnitudes de entrada son gaussiana, triangular y gaussiana, respectivamente y la FDP de la magnitud de salida g_y aparece como asimétrica, como generalmente ocurre en modelos no lineales o asimétricos g_x .

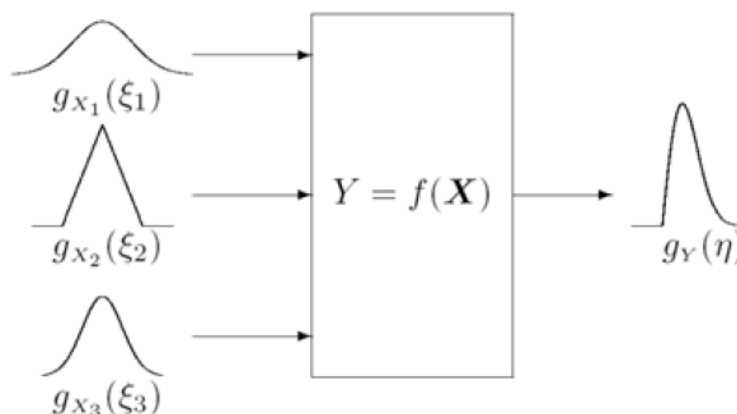


Figura 3.2 Ilustración de la propagación de distribuciones.

En la práctica, únicamente en casos sencillos se puede llevar a cabo la propagación de distribuciones sin realizar aproximaciones. El enfoque clásico de la GUM aplica un método aproximado y el método de Monte Carlo otro distinto. Solo para un pequeño pero importante subconjunto de problemas, el enfoque clásico de la GUM es exacto. El método de Monte Carlo nunca es exacto, pero ofrece resultados más válidos que el enfoque clásico, en un amplio número de problemas.

3.2.4. Método de Monte Carlo.

El método de Monte Carlo proporciona una aproximación general para obtener una representación numérica aproximada G de la función de distribución de Y . El punto clave de la propuesta consiste en muestrear repetidamente a partir de las

funciones de densidad de probabilidad (FDP) de las magnitudes de entrada y evaluar el modelo en cada caso. Puesto que la función de distribución codifica toda la información conocida de Y , cualquier propiedad de Y como la esperanza matemática, la varianza (desviación típica elevada al cuadrado) y los intervalos de cobertura pueden aproximarse utilizando G . La calidad de estos resultados mejora al aumentar el número de veces que se muestrean las FDP.

La esperanza matemática y varianza se pueden determinar directamente a partir del conjunto de valores y_r , ($r = 1, \dots, M$) obtenidos del modelo, donde M es el número de reiteraciones de Monte Carlo. La determinación de los intervalos de cobertura exige que estos valores del modelo estén ordenados.

Cada y_r se obtiene mediante el muestreo aleatorio de cada una de las FDP de las magnitudes de entrada y la evaluación del modelo para los valores obtenidos del muestreo. La representación discreta G de la función de distribución para la magnitud de salida Y , está formada por los y_r dispuestos en orden estrictamente creciente.

El método de Monte Carlo como aplicación para la propagación de distribuciones se puede establecer como un procedimiento paso a paso:

- 1) Seleccionar el número M de reiteraciones de Monte Carlo a realizar.
- 2) Generar M muestras de cada una de las FDP asignadas a las magnitudes de entrada X_i .
- 3) Deducir los M valores del modelo.
- 4) Ordenar los M valores del modelo en orden estrictamente creciente, utilizando estos valores ordenados para obtener la representación discreta G de la función de distribución para la magnitud de salida Y .
- 5) Utilizar G para deducir una estimación y de Y y la incertidumbre típica $u(y)$ asociada a y .
- 6) Utilizar G para deducir un intervalo de cobertura adecuado para Y , para un nivel de confianza establecido p .

El paso 5) puede llevarse a cabo utilizando los M valores del modelo de Y sin necesidad de estar ordenados. Sin embargo, si será necesario ordenar estos valores del modelo para determinar el intervalo de cobertura en el paso 6).

La eficacia del método de Monte Carlo para determinar y , $u(y)$ y un intervalo de cobertura de Y , depende de la utilización de un valor de M suficientemente grande.

La Figura 3.3 muestra esquemáticamente el procedimiento de evaluación de la incertidumbre utilizando el método de Monte Carlo para la propagación de distribuciones.

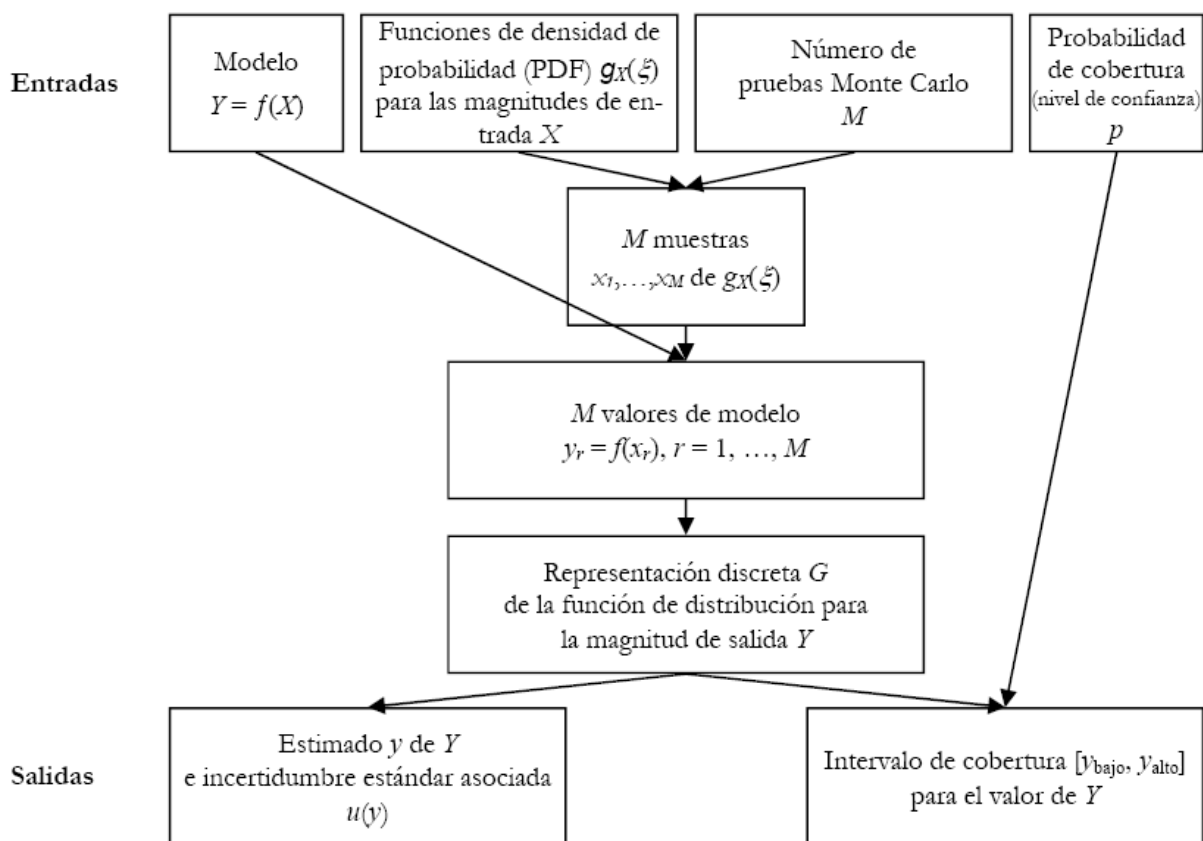


Figura 3.3 Procedimiento de evaluación de la incertidumbre mediante el método de Monte Carlo.

La propagación de distribuciones realizada mediante el método de Monte Carlo es válida a partir de la aproximación propuesta en este apartado, bajo las siguientes condiciones:

- 1) f es continua con respecto a los elementos X_i de X en el entorno de las mejores estimaciones x_i de las X_i ,
- 2) la función de distribución de Y es continua y estrictamente creciente,
- 3) la FDP de Y es:
 - a. continua en todo el intervalo para el que esta FDP es estrictamente positiva,
 - b. unimodal, es decir, tiene un único máximo,
 - c. Estrictamente creciente (o cero) a la izquierda del máximo y estrictamente decreciente (o cero) a la derecha del máximo.
- 4) existe esperanza matemática y varianza de Y ,
- 5) se utiliza un valor suficientemente grande de M .

3.2.4.1. Número de reiteraciones en el método de Monte Carlo.

El número M de reiteraciones a realizar con el método de Monte Carlo es el número de evaluaciones del modelo. Éste puede elegirse a priori, en cuyo caso no habrá un control directo de la calidad de los resultados numéricos proporcionados por el método de Monte Carlo. Sin embargo, un valor de $M = 10^6$ suele proporcionar un intervalo de cobertura para un nivel de confianza del 95 % ($p = 0,95$, siendo p la probabilidad de cobertura o nivel de confianza) para la magnitud de salida, de forma que la amplitud del intervalo es correcta con una o dos cifras decimales significativas.

Debe elegirse un valor de M grande comparado con $1/(1-p)$, por ejemplo, M al menos 10^4 veces mayor que $1/(1-p)$. Así podrá esperarse que G proporcione una representación discreta y razonable de la función de distribución de Y en las regiones cercanas a los límites de un intervalo de cobertura del $100p$ % (nivel de confianza p expresado en %) de Y .

Dado que no hay garantía que éste o cualquier número específico sea suficiente, existe la posibilidad de utilizar un procedimiento adaptativo que seleccione M de forma automática, a medida que las reiteraciones vayan sucediéndose. Una

característica de tal proceso es que toma un número de reiteraciones que es económicamente consistente con el requisito para alcanzar el grado requerido de la aproximación.

3.2.4.2. Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad.

En una implementación del método de Monte Carlo con M reiteraciones, las muestras $x_i (i = 1, \dots, M)$ son obtenidas a partir de las funciones de densidad de probabilidad (FDP) de las magnitudes de entrada X_i , asignadas a partir de las mejores estimaciones de X_i (esperanzas matemáticas) y de sus incertidumbres típicas asociadas (desviaciones típicas).

3.2.4.3. Evaluación del modelo.

El modelo es evaluado para cada una de las M muestras que se obtienen a partir de las FDP de las magnitudes de entrada

$$y_r = f(x_r) ; r = 1, \dots, M$$

3.2.4.4. Representación discreta de la función de distribución de Y.

Como ya se ha comentado anteriormente, para realizar una representación discreta, denominada como G , de la función de distribución se deben ordenar los M valores del modelo en orden estrictamente creciente.

Cuando y_r se representa en forma de histograma (con una anchura de intervalo adecuada) forma una distribución de frecuencias que, normalizada para tener un área unitaria, proporciona una aproximación a la función de densidad de probabilidad (FDP) de Y . Generalmente los cálculos no se realizan a partir de este histograma, cuya resolución depende de la elección de la anchura del intervalo, sino basándose en G . El histograma, no obstante, puede ser útil como ayuda para entender la naturaleza de la FDP, por ejemplo el grado de asimetría.

3.2.4.5. Estimación de la magnitud de salida y de su incertidumbre típica asociada.

A partir de la aproximación G de la función de distribución se obtiene la media aritmética y la desviación típica de todos los valores de y_r , las cuales se toman,

respectivamente, como una estimación y de Y , y su incertidumbre típica $u(y)$ asociada a y .

3.2.4.6. Intervalo de cobertura para una magnitud de salida.

El intervalo de cobertura para una magnitud de salida se define como el intervalo que contiene el valor de la magnitud, con una probabilidad establecida p . En general, existe más de un intervalo de cobertura para una probabilidad establecida. Un intervalo de cobertura para Y puede determinarse a partir de la representación discreta G de la función de distribución de Y . Sea $q = pM$, si pM es un entero. Si no es así, tómesese q como la parte entera de $pM + 1/2$. Entonces $[y_{\inf}, y_{\sup}]$ es un intervalo de cobertura del $100p$ % para Y donde, para cualquier $r = 1, \dots, M - q$, se cumple:

$$y_{\inf} = y_r$$

$$y_{\sup} = y_{(r+q)}$$

El Suplemento 1 de la GUM clasifica los intervalos de cobertura en dos tipos:

Por un lado, el intervalo de cobertura con probabilidad simétrica del $100p$ %, que se calcula tomando $r = (M - q)/2$, si $(M - q)/2$ es un entero, o la parte entera de $(M - q + 1)/2$ en caso contrario.

Por otro lado, el menor intervalo de cobertura del $100p$ %, el cual se obtiene tomando un r^* tal que, para $r = 1, \dots, M - q$:

$$y_{(r^*+q)} - y_{r^*} \leq y_{(r+q)} - y_r \quad (3.1)$$

El proceso consiste en calcular todos los intervalos de cobertura para una probabilidad del $100p$ % y seleccionar el intervalo de menor amplitud, el cual se corresponde con el menor intervalo de cobertura. El menor intervalo de cobertura se encuentra siempre en la zona de mayor densidad de probabilidad.

Para funciones de densidad de probabilidad (FDP) de Y simétricas alrededor de la estimación y , tales como la distribución gaussiana y la distribución t , el intervalo de cobertura con probabilidad simétrica del $100p$ % y el menor intervalo de cobertura

del 100% son idénticos, puesto que ambos se sitúan simétricos alrededor de la estimación y . Sin embargo, cuando la FDP de Y es asimétrica, el intervalo de cobertura no se sitúa simétrico alrededor de la estimación y , resultando el menor intervalo de cobertura más apropiado que el intervalo de cobertura con probabilidad simétrica cuando la FDP de la magnitud de salida es asimétrica.

3.2.5. Comparación entre el enfoque GUM y el método de Monte Carlo descrito.

A efectos de comparar el enfoque clásico de la GUM y el método de Monte Carlo, es útil revisar las consideraciones de la GUM relativas a las evaluaciones de incertidumbre Tipo A y Tipo B. Para la evaluación Tipo A, la GUM proporciona una guía para la obtención de la mejor estimación de una magnitud y su incertidumbre típica asociada a partir de la media y de la desviación típica de un conjunto de indicaciones de la magnitud, obtenidas independientemente. Para la evaluación Tipo B, el conocimiento previo relativo a la magnitud se utiliza para caracterizarla mediante una función de densidad de probabilidad (FDP), a partir de la cual se determinan la mejor estimación de la magnitud y su incertidumbre típica asociada. La GUM establece que ambos tipos de evaluación están basados en distribuciones de probabilidad y que ambas aproximaciones emplean interpretaciones admitidas sobre la probabilidad.

La GUM considera las FDP como base para la evaluación de la incertidumbre: en el contexto de la ley de propagación de incertidumbres, hace referencia explícita a las magnitudes de entrada y salida como definidas y caracterizadas mediante distribuciones de probabilidad.

Las desviaciones del método de Monte Carlo con respecto al enfoque clásico son:

- 1) Las FDP están explícitamente asignadas a todas las magnitudes de entrada X_i basándose en la información relativa a dichas magnitudes. No se necesita la clasificación en evaluaciones de incertidumbre Tipo A y Tipo B.
- 2) No se necesitan las derivadas parciales de primer orden y orden superior utilizadas para proporcionar los coeficientes de sensibilidad en la ley de propagación de incertidumbres. Por lo tanto, requiere un menor esfuerzo en el análisis necesario para modelos no lineales o complejos.

- 3) Se obtiene una representación numérica de la función de distribución de Y definida completamente a partir del modelo y de las FDP de X_i , y no limitadas a una distribución gaussiana o a una distribución t .
- 4) Dado que la FDP de Y no es en general simétrica, un intervalo de cobertura de Y no queda necesariamente centrado en la estimación de Y . Además, no es necesario un factor de cobertura cuando se determina un intervalo de cobertura. En el enfoque clásico, los intervalos de cobertura, se obtienen utilizando hipótesis adicionales, como que la distribución de Y es gaussiana o una distribución t .
- 5) En modelos no lineales proporciona la mejor estimación de Y y la incertidumbre típica asociada a la estimación de Y , especialmente cuando las X_i tienen asignadas FDP no gaussianas, por ejemplo asimétricas.

3.3. Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo.

Según se ha mencionado en el apartado 6.2.2. *“Propagación de distribuciones. Método de Monte Carlo”*, el método de Monte Carlo es una alternativa práctica al enfoque clásico de la GUM sobre la evaluación de la incertidumbre, en situaciones donde se dan condiciones que impiden el cumplimiento de los requisitos del enfoque clásico o su cumplimiento es poco evidente.

En el ensayo que nos ocupa, que consiste en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia, los laboratorios de ensayo no proporcionan información alguna acerca de la incertidumbre asociada al resultado del ensayo. Se podría pensar que para calcular la incertidumbre asociada al resultado de este método de ensayo, basta con seguir el procedimiento descrito en el enfoque clásico de la GUM. Sin embargo, el modelo matemático de este método de ensayo es complejo (ecuación (3.3)), lo cual provoca que:

- Sea difícil proporcionar las derivadas parciales del modelo utilizadas para determinar los coeficientes de sensibilidad, tal como requiere el enfoque clásico de la GUM;

- El modelo pueda no ser lineal, dando lugar a valores de incertidumbre erróneos si solo se emplean las derivadas parciales de primer orden [9].

Por estos motivos, en este método de ensayo la incertidumbre no se calculó mediante el enfoque clásico GUM. Éste es un claro ejemplo en el que el método de Monte Carlo es una alternativa práctica al enfoque clásico de la GUM sobre la evaluación de la incertidumbre, ya que es más fácil de aplicar porque sólo se necesita evaluar valores del modelo. A continuación, se desarrolla paso a paso el método de Monte Carlo aplicado al cálculo de la incertidumbre asociada al resultado de un ensayo de medida del coeficiente de absorción en tubo de impedancia.

3.3.1. Modelo matemático.

En el ensayo bajo estudio, el coeficiente de absorción acústica α es el mensurando, es decir, la magnitud particular bajo medición. Si se introduce la ecuación (2.40) en (2.41), el coeficiente de absorción α se puede definir como:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \right|^2 \quad (3.2)$$

Además, si se sustituye en (3.2) las ecuaciones (2.2, 2.28, 2.29, 2.35, 2.38 y 2.39), se obtiene el modelo matemático resultante:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\frac{\hat{H}_{12}}{(H_{12}^I \times H_{21}^{II})^{1/2}} - e^{-j \frac{2\pi f}{343,2\sqrt{T/293}} s}}{e^{j \frac{2\pi f}{343,2\sqrt{T/293}} s} - \frac{\hat{H}_{12}}{(H_{12}^I \times H_{21}^{II})^{1/2}}} e^{2j \frac{2\pi f}{343,2\sqrt{T/293}} x_1} \right|^2 \quad (3.3)$$

Este modelo matemático no incluye la constante de atenuación en el tubo k_0'' debido a que, según la Norma UNE-EN ISO 10534-2, normalmente este efecto no influye en los resultados obtenidos usando los métodos dados en esa parte de la norma. No obstante, la norma comenta que sí deben aplicarse correcciones por pérdidas en la evaluación de las magnitudes cuando la distancia desde la superficie de la muestra en ensayo al micrófono más cercano es mayor que tres veces el diámetro del tubo. Puesto que la distancia entre la muestra y el micrófono más cercano es 0,0509 m y el diámetro del tubo es 0,0349 m (tres veces el diámetro del tubo es 0,1047 m), en este caso no es necesario aplicar correcciones.

3.3.2. Magnitudes de entrada.

A partir del modelo matemático se definen las magnitudes de entrada que contribuyen a la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia. En la Tabla 3.1 se muestra cada magnitud de entrada con su correspondiente función de densidad de probabilidad (FDP).

<i>Magnitud de entrada</i>	<i>Descripción</i>	<i>Función de densidad de probabilidad</i>
\hat{H}_{12}	Función de transferencia sin corrección por desajuste entre los canales de los micrófonos	Normal y Rectangular
H_{12}^I	Función de transferencia con la configuración I del proceso de corrección por desajuste entre los canales de los micrófonos	Rectangular
H_{21}^{II}	Función de transferencia con la configuración II del proceso de corrección por desajuste entre los canales de los micrófonos	Rectangular
T	Temperatura en Kelvins	Rectangular
s	Separación, en metros, entre los dos micrófonos	Rectangular
x_1	Distancia, en metros, entre la muestra y la posición última del micrófono (posición 1)	Rectangular

Tabla 3.1 Magnitudes de entrada y sus FDP.

Generalmente, los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, siguen en buena aproximación una distribución normal. Por ello, se asigna una FDP normal a \hat{H}_{12} , debida a la medición de n funciones de transferencia y caracterizada por su desviación típica de

la media, que representa la dispersión de las n mediciones. Las FDP rectangulares se asignan a las magnitudes de entrada debido a las resoluciones de los equipos de medición empleados. Si la resolución del dispositivo de lectura del equipo es δx , el valor de señal de entrada correspondiente a una lectura de valor X , puede situarse con igual probabilidad en cualquier punto dentro del intervalo $X - \delta x/2$ a $X + \delta x/2$. La señal de entrada puede describirse entonces mediante una distribución de probabilidad rectangular de amplitud δx . Puesto que las funciones de transferencia y el coeficiente de absorción varían en función de la frecuencia, en el modelo también está incluida la variable f , que representa la frecuencia.

3.3.3. Procedimiento de cálculo.

El procedimiento de cálculo que se describe a continuación, se lleva a cabo para cada una de las frecuencias discretas incluidas en los tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz (en el ANEXO A se detallan las frecuencias discretas incluidas en cada tercio de octava). En el presente trabajo se midieron las funciones de transferencia hasta 10000 Hz con una resolución en frecuencia de 25 Hz . Por tanto, el rango de frecuencias discretas incluidas en los tercios de octava bajo estudio abarca desde 100 Hz hasta 5650 Hz (223 frecuencias discretas). Esto conlleva que el procedimiento de cálculo se realice 223 veces.

3.3.3.1. Programas empleados.

Para aplicar el método de Monte Carlo se utiliza el software de cálculo Excel y el software matemático Matlab. Excel se emplea como base de datos donde, por un lado, se introducen los valores de las magnitudes de entrada y, por otro lado, se exportan los datos de salida generados por Matlab al aplicar el método de Monte Carlo para su presentación. En cuanto a Matlab, se trata del programa principal encargado de importar los datos de entrada desde un archivo Excel (mediante la función *XLSREAD*), llevar a cabo el cálculo de la incertidumbre aplicando el método de Monte Carlo y, por último, exportar los resultados a otro archivo Excel (mediante la función *XLSWRITE*).

3.3.3.2. Número de reiteraciones M .

Se designa un valor de $M = 10^6$ que suele proporcionar un intervalo de cobertura para un nivel de confianza del 95% ($p = 0,95$) para la magnitud de salida, de forma que la amplitud del intervalo es correcta para una o dos cifras decimales significativas. Además, el Suplemento 1 de la GUM, especifica que M debe ser

grande comparado con la relación $1/(1-p)$, al menos 10^4 veces mayor, que con el valor de $M = 10^6$ se cumple holgadamente.

3.3.3.3. Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad.

Para cada magnitud de entrada se generan 10^6 valores aleatorios según su tipo de función de densidad de probabilidad (FDP). Para generar valores aleatorios de la magnitud de entrada \hat{H}_{12} , según una función de densidad de probabilidad normal, se utiliza la función de Matlab ***normrnd***, en la cual se introduce el promedio y la desviación típica de la media de las funciones de transferencia medidas. La desviación típica de la media aritmética de una serie de observaciones no es el error aleatorio de la media, sino que se trata de una medida de la incertidumbre de la media, debida a los efectos aleatorios; se puede decir que es la medida correcta de la incertidumbre de un resultado de medida, en lugar de la desviación de las observaciones individuales [7]. Cuando un ensayo consiste en el estudio de una sola muestra de un tipo de material, se calcula el promedio y la desviación típica de la media de las n funciones de transferencia medidas de dicha muestra. Si el ensayo está compuesto por el estudio de distintas muestras del mismo tipo de material, en primer lugar, se calcula el promedio de las n funciones de transferencia medidas de cada muestra. Por tanto, se obtiene una función de transferencia promedio para cada muestra. Finalmente, se calcula el promedio y desviación típica de la media de las m funciones de transferencia, siendo m el número de muestras distintas del mismo tipo de material estudiadas en el ensayo. Para generar valores aleatorios de las magnitudes de entrada, según una función de densidad de probabilidad rectangular, se utiliza la función de Matlab ***unifrnd***, en la cual se introducen los extremos del intervalo de la distribución rectangular. Puesto que en este caso las FDP rectangulares de las magnitudes de entrada son debidas a las resoluciones de los equipos de medida, los intervalos de las FDP rectangulares se calculan a partir de los valores medidos y las resoluciones de los equipos. Siendo X el valor medido y δx la resolución del equipo de medida, el extremo inferior del intervalo se calcula a partir de $X - \delta x/2$ y el extremo superior a partir de $X + \delta x/2$, donde $\delta x/2$ es el máximo error posible atribuido a la resolución del equipo.

Cuando una magnitud de entrada es afectada por diferentes tipos de distribuciones, como es el caso de \hat{H}_{12} , se deben generar los valores aleatorios correspondientes a cada distribución. El promedio de los valores generados con cada

distribución da como resultado los valores aleatorios asignados a la magnitud de entrada [11]. En este caso, la magnitud de entrada \hat{H}_{12} está afectada por una FDP normal y una FDP rectangular. Para generar los 10^6 valores aleatorios de \hat{H}_{12} siguiendo una FDP normal, se emplea la función **normrnd**, tal y como se ha comentado en el párrafo anterior, obteniendo una distribución normal de valores en torno al promedio de las funciones de transferencia medidas. Para generar los 10^6 valores aleatorios de \hat{H}_{12} siguiendo una FDP rectangular, se emplea la función **unifrnd**, introduciendo los extremos del intervalo de la distribución rectangular. En este caso, hay que tener cuidado a la hora de determinar el intervalo de la distribución rectangular. A diferencia del resto de magnitudes de entrada, en las que el máximo error posible debido a la resolución del equipo se aplica solamente al valor medido, en la magnitud \hat{H}_{12} , este error no puede atribuirse solamente al valor promedio de \hat{H}_{12} , puesto que es obtenido a partir de n mediciones. Por tanto, el error afectará a los valores de la distribución normal y no solo al promedio. Por este motivo, se decide aplicar el máximo error posible debido a la resolución del equipo, al intervalo de valores de la distribución normal que garantizan un nivel de confianza del 95 %, definiendo los extremos del intervalo de la distribución rectangular centrada en torno al valor promedio de \hat{H}_{12} como:

$$E_{\text{inf}} = \bar{x} - \left(2s(\bar{x}) + \frac{res_x}{2} \right) \quad (3.4)$$

$$E_{\text{sup}} = \bar{x} + \left(2s(\bar{x}) + \frac{res_x}{2} \right) \quad (3.5)$$

siendo

E_{inf} , el extremo inferior del intervalo de la distribución rectangular;

E_{sup} , el extremo superior del intervalo de la distribución rectangular;

\bar{x} , el valor promedio de la magnitud de entrada x ;

$s(\bar{x})$, la desviación típica de la media de las n mediciones realizadas de x ;

res_x , la resolución del equipo para la magnitud de entrada x .

Finalmente, se promedian los valores aleatorios resultantes de cada distribución de probabilidad, obteniendo los 10^6 valores aleatorios asignados a la magnitud de entrada \hat{H}_{12} . La Figura 3.4 muestra de forma gráfica un ejemplo de lo comentado anteriormente, en el que una magnitud de entrada es afectada por una FDP normal y una rectangular. Tanto la FDP normal como la FDP rectangular están centradas en torno al valor promedio de las mediciones. Se observa que la FDP resultante es una normal más estrecha.

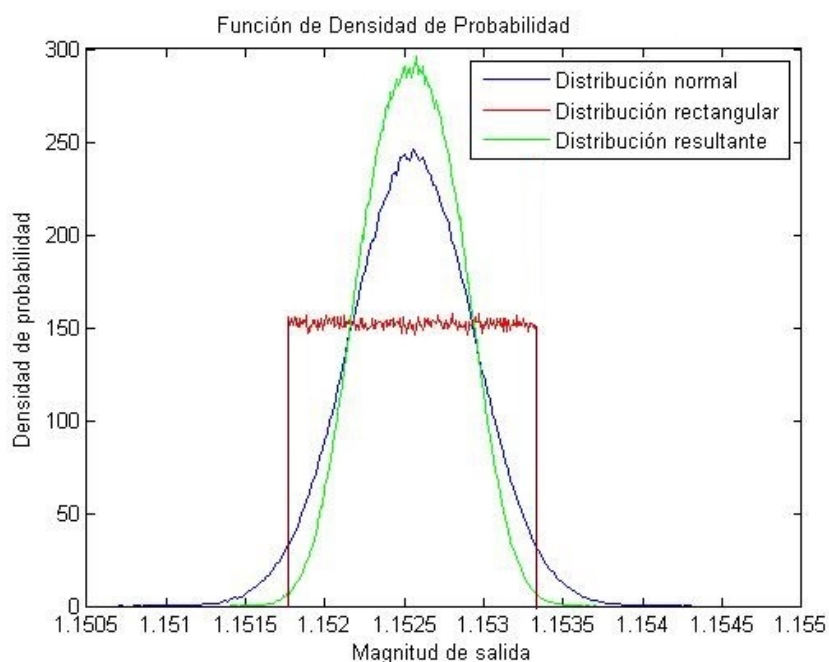


Figura 3.4 Propagación de distribuciones normal y rectangular.

3.3.3.4. Evaluación del modelo.

Es el momento en el que se lleva a cabo la propagación de las funciones de densidad de probabilidad (FDP) de las magnitudes de entrada mediante el modelo, proporcionando la FDP de la magnitud de salida. Consiste en evaluar el modelo para cada uno de los 10^6 valores de las magnitudes de entrada, obteniendo 10^6 valores del coeficiente de absorción acústica α . La Figura 3.5 muestra de forma esquemática las magnitudes de entrada y sus funciones de densidad de probabilidad involucradas en el proceso de propagación de distribuciones de este método de ensayo.

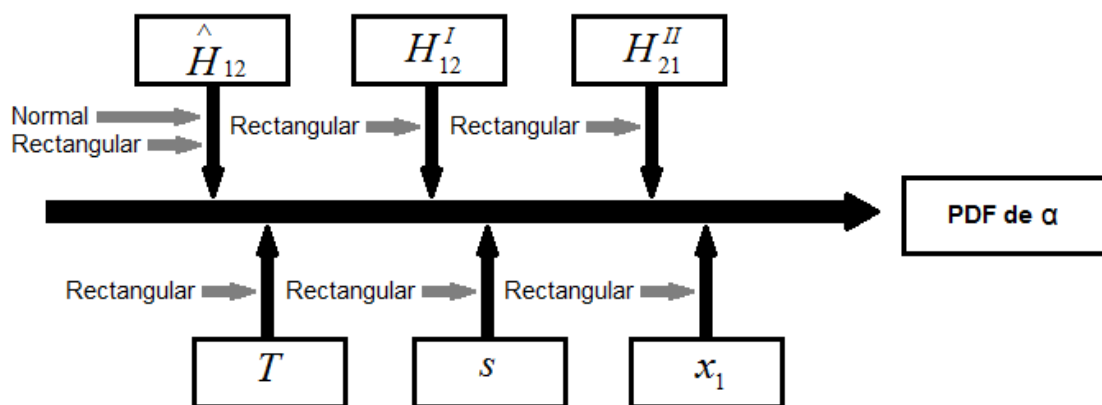


Figura 3.5 Propagación de distribuciones de las 6 magnitudes de entrada para obtener la FDP del coeficiente de absorción acústica.

3.3.3.5. Representación discreta G de la función de distribución del coeficiente de absorción acústica.

Una vez evaluado el modelo se clasifican los 10^6 valores del coeficiente de absorción acústica en orden estrictamente creciente, para ello se utiliza la función de Matlab llamada **sort**. Además, se generan los valores de probabilidades acumuladas uniformemente espaciadas en función del número de valores aleatorios. A continuación, se asignan las probabilidades acumuladas uniformemente espaciadas a los 10^6 valores ordenados para poder llevar a cabo la representación discreta G de la función de distribución de α . Una vez se conoce G se puede deducir cualquier propiedad de α . Además, existe la posibilidad de representar el histograma de α mediante la función **hist**. Aunque los cálculos no se realizan a partir de este histograma, es útil para entender la naturaleza de la función de densidad de probabilidad (FDP) de α puesto que proporciona una aproximación de ésta.

3.3.3.6. Estimación de α y de su incertidumbre típica asociada u .

Dos de las propiedades de α que se pueden deducir de G , son la estimación de α y su incertidumbre típica asociada u . Realmente el cálculo de estos parámetros estadísticos podría llevarse a cabo utilizando los 10^6 valores de α sin necesidad de estar ordenados. La estimación de α corresponde con la media aritmética de los 10^6 valores de α , calculada mediante la función de Matlab **mean**. Esta estimación de α obtenida por el método de Monte Carlo se puede comparar con el α promedio de las n mediciones determinado en el ensayo. La deducción de la incertidumbre de α es el

objetivo principal de todo el procedimiento de cálculo llevado a cabo en este trabajo y se corresponde con la desviación típica de los 10^6 valores de α , calculada mediante la función de Matlab **std**.

3.3.3.7. Intervalo de cobertura para α .

A partir de la representación discreta G de la función de distribución de α , también se puede deducir un intervalo de cobertura para α , para un nivel de confianza establecido. Este intervalo está dado como el menor intervalo de cobertura para un nivel de confianza del 95 % ($p = 0,95$), ya que es apropiado tanto para los casos en que la función de densidad de probabilidad (FDP) de la magnitud de salida es simétrica como los casos en que es asimétrica. El proceso consiste en calcular todos los intervalos de cobertura para una probabilidad del 95 % y seleccionar el intervalo de menor amplitud, el cual se corresponde con el menor intervalo de cobertura. Una vez conocemos el menor intervalo de cobertura se pueden calcular los factores de cobertura k , tanto inferior (3.6) como superior (3.7), para un nivel de confianza del 95 %, que se emplearán en la presentación de resultados.

$$k_{\text{inf}} = (\alpha - \alpha_{\text{inf}}) / u \quad (3.6)$$

$$k_{\text{sup}} = (\alpha_{\text{sup}} - \alpha) / u \quad (3.7)$$

donde

k_{inf} y k_{sup} son los factores de cobertura inferior y superior, respectivamente. En el caso de que la función de densidad de probabilidad FDP del coeficiente de absorción sea simétrica alrededor de la estimación de α , $k_{\text{inf}} = k_{\text{sup}}$;

α es la estimación del coeficiente de absorción;

α_{inf} y α_{sup} son los extremos inferior y superior, respectivamente, del intervalo de cobertura;

u es la incertidumbre típica asociada a α .

A continuación, se muestra como ejemplo los resultados obtenidos en el ensayo de una muestra de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL. La Figura 3.6 muestra la representación discreta G de la función de distribución de probabilidad del coeficiente de absorción acústica en 200 Hz. Además, la Figura 3.7

representa el histograma del coeficiente de absorción en 200 Hz . En ambas figuras, las líneas discontinuas corresponden con los extremos del menor intervalo de cobertura para α , con un nivel de confianza del 95 %.

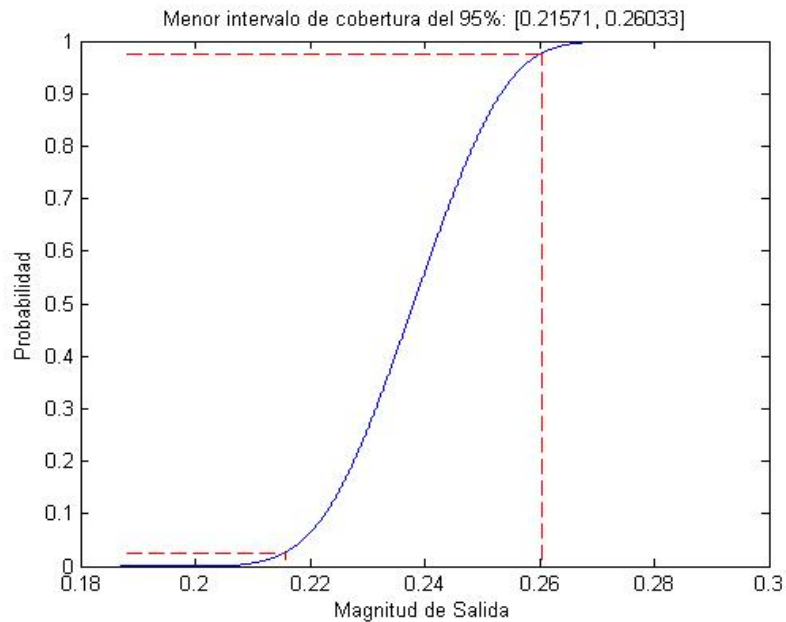


Figura 3.6 Representación discreta G de la función de distribución de probabilidad de α en la frecuencia discreta de 200 Hz .

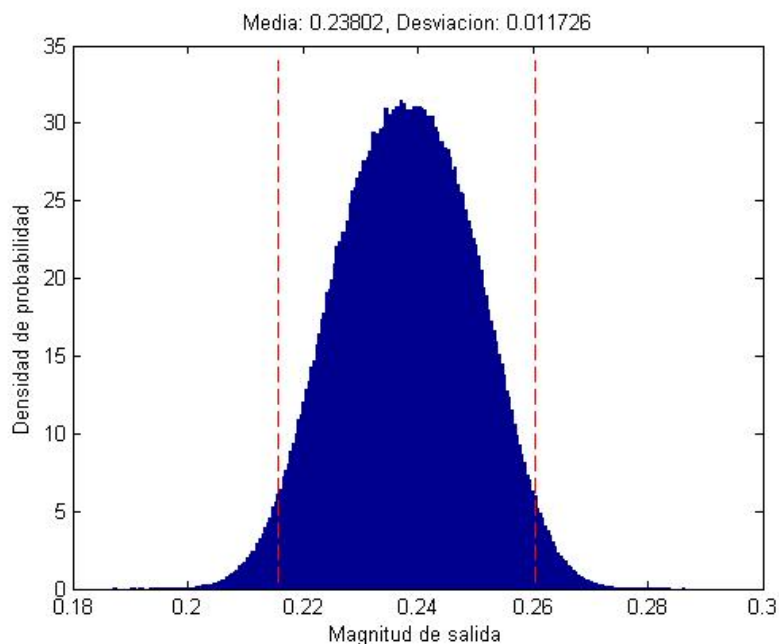


Figura 3.7 Función de densidad de probabilidad de α o histograma de α en la frecuencia discreta de 200 Hz .

3.3.4. Presentación de resultados.

Hasta el momento, los datos proporcionados por el método de Monte Carlo se han obtenido para cada frecuencia discreta, sin embargo, para este tipo de ensayos se decidió presentar los resultados en tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz . Para presentar los resultados en tercios de octava se exporta a una hoja de Excel la siguiente información correspondiente a cada frecuencia discreta:

- la estimación de α , que a pesar de no ser incluida en el resultado final, puede ser interesante presentarla en tercios de octava para compararla con el coeficiente de absorción α promedio de las n mediciones determinado en el ensayo, con el fin de analizar el grado de aproximación proporcionado por el procedimiento de cálculo;
- la incertidumbre típica asociada u que necesariamente hay que presentarla en tercios de octava;
- los factores de cobertura k_{inf} y k_{sup} que se utilizan para calcular el menor intervalo de cobertura para un nivel de confianza del 95 % de cada tercio de octava.

Para obtener la estimación de α de un tercio de octava, se promedian las estimaciones de α correspondientes a las frecuencias discretas comprendidas entre las frecuencias inferior y superior de dicho tercio de octava. Para saber cuáles son las frecuencias inferiores y superiores de cada tercio de octava, véase ANEXO A.

La incertidumbre típica asociada u de un tercio de octava se obtiene llevando a cabo un promedio cuadrático de las incertidumbres correspondientes a las frecuencias discretas comprendidas entre las frecuencias inferior y superior de dicho tercio de octava.

El factor de cobertura k_{inf} de un tercio de octava se obtiene promediando los k_{inf} correspondientes a las frecuencias discretas comprendidas entre las frecuencias inferior y superior de dicho tercio de octava. De la misma manera se obtiene k_{sup} . Para calcular el intervalo de cobertura para un nivel de confianza del 95 % de un tercio de octava, simplemente basta con despejar α_{inf} y α_{sup} de las ecuaciones (3.6) y (3.7),

respectivamente, empleando el valor de α promedio de las n mediciones determinado en el ensayo.

Finalmente, se presenta para cada tercio de octava de 100 Hz a 5000 Hz : el coeficiente de absorción α promedio de las n mediciones determinado en el ensayo, su incertidumbre típica asociada u y el intervalo de cobertura para α con un nivel de confianza del 95 %. Esta es la forma en que se presentan los resultados cuando se emplea el método de Monte Carlo para la evaluación de la incertidumbre de medida.

Si se desea presentar los resultados de un ensayo tal y como especifica el enfoque clásico de la GUM, se debe exponer para cada tercio de octava de 100 Hz a 5000 Hz la siguiente información:

- 1) el coeficiente de absorción α promedio de las n mediciones determinado en el ensayo;
- 2) la incertidumbre expandida $\pm U$ basada en la incertidumbre típica u multiplicada por un factor de cobertura k que garantiza un nivel de confianza aproximado del 95 %.

Para presentar los resultados de esta manera, se determina el factor de cobertura k como el máximo entre k_{inf} y k_{sup} . Esta medida supone ampliar el intervalo de cobertura en el caso de que $k_{inf} \neq k_{sup}$, obteniendo un intervalo de cobertura para un nivel de confianza mayor o igual al 95 %. En definitiva, se está incrementando levemente la incertidumbre puesto que, en general, k_{inf} y k_{sup} tienen valores muy parecidos. Finalmente, la incertidumbre expandida U se obtiene multiplicando la incertidumbre típica u por el factor de cobertura k , presentando el resultado como $\alpha \pm U$.

3.3.5. Coeficientes de absorción e incertidumbres asociadas de varios ensayos.

Una vez se aplica el procedimiento de cálculo de la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción acústica determinado en tubo de impedancia, es posible presentar el resultado completo de un ensayo, es decir, el coeficiente de absorción medido y su incertidumbre asociada. En este trabajo se optó por presentar los resultados según especifica el enfoque clásico de la GUM ($\alpha \pm U$), puesto que es

la forma habitual de presentación en cualquier documento. Cabe destacar que aunque el valor de la incertidumbre debería presentarse con dos decimales al igual que el coeficiente de absorción, en el presente trabajo se presenta con tres decimales puesto que suele tener un valor muy bajo y con tres decimales se mejora el análisis comparativo.

La Tabla 3.2 contiene los resultados obtenidos en cuatro ensayos en los que se estudian muestras de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652.

	Muestra 1 Lana Roca ROCKWOOL		Muestra 2 Lana Roca ROCKWOOL		Muestra 3 Lana Roca ROCKWOOL		Muestra 4 Lana Roca ROCKWOOL	
Frecuencia (Hz)	α_1	$\pm U_1$	α_2	$\pm U_2$	α_3	$\pm U_3$	α_4	$\pm U_4$
100	0,00	0,005	0,00	0,007	0,00	0,004	0,00	0,007
125	0,00	0,004	0,02	0,004	0,03	0,006	0,04	0,009
160	0,10	0,002	0,13	0,003	0,13	0,005	0,13	0,008
200	0,16	0,002	0,19	0,002	0,19	0,006	0,19	0,009
250	0,28	0,002	0,31	0,003	0,30	0,007	0,31	0,007
315	0,44	0,002	0,47	0,003	0,45	0,006	0,45	0,005
400	0,55	0,002	0,57	0,003	0,56	0,005	0,56	0,003
500	0,67	0,002	0,66	0,003	0,66	0,004	0,65	0,003
630	0,76	0,001	0,73	0,001	0,75	0,002	0,73	0,001
800	0,83	0,005	0,79	0,020	0,80	0,002	0,76	0,008
1000	0,91	0,004	0,90	0,007	0,86	0,008	0,91	0,015
1250	0,93	0,001	0,88	0,001	0,91	0,001	0,88	0,003
1600	0,92	0,001	0,88	0,000	0,90	0,001	0,88	0,001
2000	0,92	0,001	0,89	0,001	0,91	0,002	0,90	0,001
2500	0,93	0,001	0,92	0,001	0,93	0,002	0,92	0,003
3150	0,94	0,001	0,94	0,001	0,95	0,001	0,93	0,002
4000	0,96	0,001	0,95	0,001	0,95	0,001	0,94	0,002
5000	0,98	0,002	0,97	0,003	0,97	0,002	0,97	0,003

Tabla 3.2 Coeficientes de absorción e incertidumbres asociadas obtenidos en cuatro ensayos de muestras de lana de roca de ROCKWOOL.

La Tabla 3.3 contiene los resultados obtenidos en cuatro ensayos en los que se estudian muestras de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER.

Frecuencia (Hz)	Muestra 1 Lana Mineral ISOVER		Muestra 2 Lana Mineral ISOVER		Muestra 3 Lana Mineral ISOVER		Muestra 4 Lana Mineral ISOVER	
	α_1	$\pm U_1$	α_2	$\pm U_2$	α_3	$\pm U_3$	α_4	$\pm U_4$
100	0,00	0,022	0,00	0,014	0,02	0,005	0,01	0,008
125	0,00	0,015	0,00	0,011	0,01	0,003	0,00	0,005
160	0,00	0,006	0,00	0,010	0,00	0,003	0,00	0,003
200	0,00	0,003	0,00	0,008	0,01	0,002	0,02	0,002
250	0,01	0,002	0,00	0,007	0,03	0,002	0,03	0,002
315	0,08	0,002	0,10	0,007	0,06	0,002	0,08	0,002
400	0,14	0,002	0,20	0,008	0,11	0,002	0,13	0,002
500	0,23	0,006	0,31	0,007	0,19	0,002	0,22	0,002
630	0,34	0,006	0,42	0,006	0,31	0,001	0,35	0,001
800	0,46	0,008	0,52	0,004	0,46	0,001	0,51	0,001
1000	0,59	0,002	0,62	0,002	0,62	0,001	0,66	0,001
1250	0,73	0,001	0,72	0,004	0,77	0,001	0,79	0,001
1600	0,84	0,002	0,85	0,008	0,89	0,006	0,91	0,006
2000	0,95	0,006	0,97	0,002	0,95	0,001	0,97	0,001
2500	0,99	0,000	1,00	0,000	0,98	0,000	0,98	0,000
3150	0,99	0,000	0,99	0,001	0,99	0,000	0,96	0,000
4000	0,97	0,001	0,95	0,001	0,97	0,001	0,95	0,001
5000	0,97	0,004	0,97	0,005	0,97	0,008	0,95	0,010

Tabla 3.3 Coeficientes de absorción e incertidumbres asociadas obtenidos en cuatro ensayos de muestras de lana mineral CLIMAVÉR NETO de ISOVER.

4

Precisión del método de ensayo

4.1. Introducción.

El objetivo del trabajo es estudiar la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubos de impedancia mediante el método de la función de transferencia, descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2.

La norma UNE 82009-1 *“Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 1: Principios generales y definiciones”* define la precisión como *“el grado de coincidencia existente entre los resultados independientes de un ensayo, obtenidos en condiciones especificadas”*. La precisión depende únicamente de la distribución de las desviaciones aleatorias y se expresa, generalmente, en términos de falta de precisión, calculándose a partir de la desviación típica de los resultados. A mayor desviación típica menor precisión. Por lo tanto, la precisión es un término general que designa la variabilidad existente entre mediciones repetidas del mismo ítem. Normalmente cuanto más preciso es un método de ensayo menor es la incertidumbre de los resultados, debido a que la precisión es una componente muy importante de la incertidumbre [8]. Las condiciones en que se obtienen los resultados independientes de un ensayo dependen de los factores que se varíen entre los ensayos y se clasifican en:

- Condiciones de repetibilidad: condiciones bajo las que se obtienen resultados independientes, con el mismo método, sobre idénticas muestras, en el mismo laboratorio, por el mismo operador, y utilizando los mismos equipos de medición, durante un corto intervalo de tiempo.
- Condiciones de reproducibilidad: condiciones bajo las cuales los resultados se obtienen con el mismo método, sobre muestras del mismo lote con homogeneidad y estabilidad garantizadas, en laboratorios diferentes, por operadores distintos y utilizando equipos de medición diferentes.

La precisión se evalúa en términos de repetibilidad (que proporciona la menor variabilidad ya que los ensayos se realizan en intervalos cortos de tiempo sin variar ningún factor) y reproducibilidad (que proporciona la mayor variabilidad ya que los ensayos se realizan de materiales que aunque son homogéneos no son los mismos y además se llevan a cabo en momentos diferentes); siendo estos términos los dos extremos de la precisión.

A continuación, se definen los parámetros relacionados con la precisión que se emplearán a lo largo del capítulo:

- Desviación típica de repetibilidad, s_r : Desviación típica de los resultados del ensayo obtenida bajo condiciones de repetibilidad.
- Límite de repetibilidad, r : Valor por debajo del cual se sitúa, con una probabilidad del 95 %, el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados de ensayo, obtenidos bajo condiciones de repetibilidad. Se calcula empleando la ecuación:

$$r = 2,8 \cdot s_r \quad (4.1)$$

- Desviación típica de reproducibilidad, s_R : Desviación típica de los resultados de ensayo obtenidos bajo condiciones de reproducibilidad.
- Límite de reproducibilidad, R : Valor por debajo del cual se sitúa, con una probabilidad del 95 %, el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados de ensayo, obtenidos bajo condiciones de reproducibilidad. Se calcula empleando la ecuación:

$$R = 2,8 \cdot s_R \quad (4.2)$$

Para más información acerca de estos parámetros, puede consultar la norma UNE 82009, que es una transposición de la norma ISO 5725.

Tal y como se comenta en el capítulo 1 “*Introducción y objetivos*” del presente trabajo, en el momento de la publicación de la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002, el método de la función de transferencia no disponía de información relativa a la reproducibilidad y repetibilidad del método. Sin embargo, actualmente se dispone de datos de precisión gracias al programa de intercomparación AQUSTUBO_IMPEDANCIA_1, organizado por ACUSTILAB, en el que participaron 9 laboratorios, uno de ellos la Escuela (ETSIST), ensayando dos tipos de materiales: uno de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652 y otro de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER. Además, la norma ASTM E1050-90 (1998) también proporciona datos de repetibilidad y reproducibilidad del método en octavas, obtenidos en un programa de prueba (round-robin) en el que participaron 10 laboratorios estudiando un tipo de material. En la Figura 4.1 se muestran gráficamente los límites de repetibilidad obtenidos en el ejercicio de

intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 y el límite de repetibilidad proporcionado por la norma ASTM E1050-90.

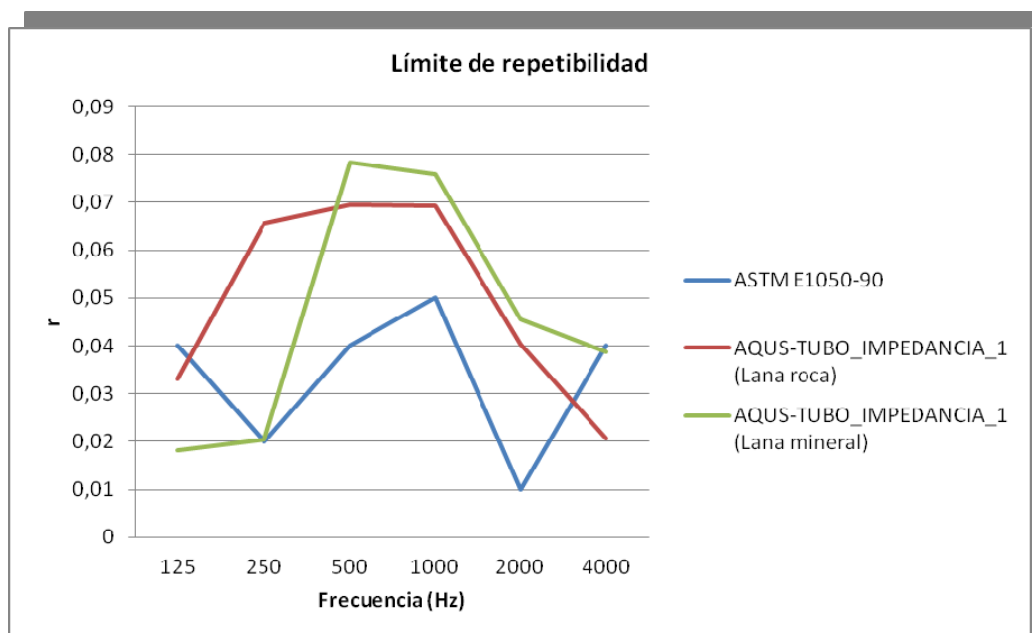


Figura 4.1 Límites de repetibilidad disponibles del método de ensayo.

En la Figura 4.2 se representan gráficamente los límites de reproducibilidad obtenidos en el ejercicio de intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 y el límite de reproducibilidad proporcionado por la norma ASTM E1050-90.

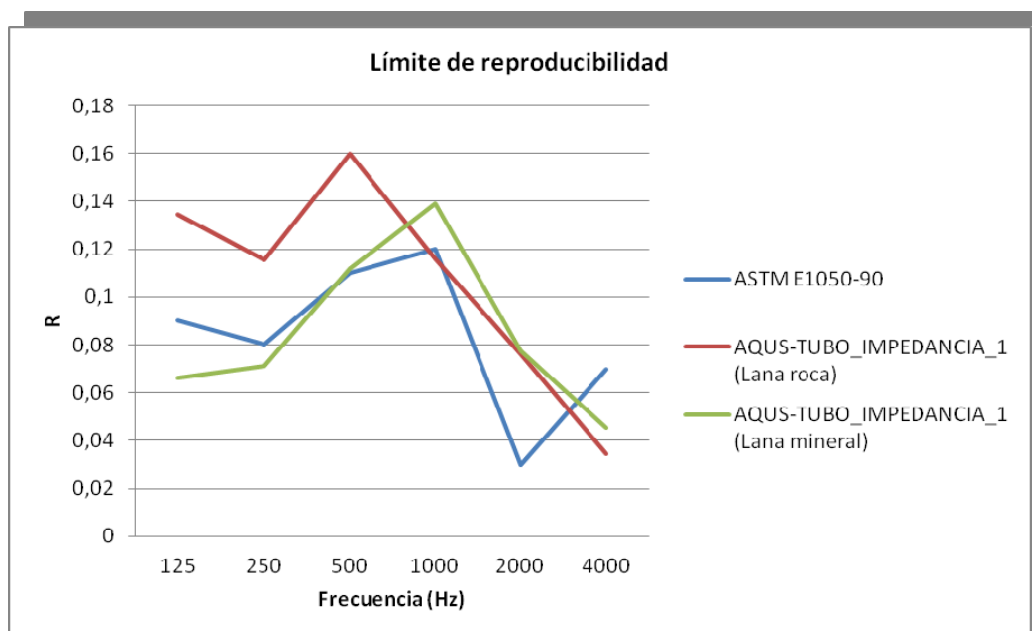


Figura 4.2 Límites de reproducibilidad disponibles del método de ensayo.

Los organizadores de la intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 entregaron los datos de precisión en tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz . Sin embargo, la norma ASTM E1050-90 solo proporciona los límites en octavas de 125 Hz a 4000 Hz . Ese es el motivo por el cual las Figuras 4.1 y 4.2 se representan en octavas en vez de tercios de octava. En general, los límites de repetibilidad y reproducibilidad obtenidos en la intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 son mayores que los proporcionados por la norma ASTM E1050-90. Por otra parte, como es lógico, los límites de reproducibilidad R son mayores que los límites de repetibilidad r .

Los resultados de los ensayos que se presentan en este trabajo se han obtenido en condiciones de repetibilidad, por lo que los estudios de precisión de este método de ensayo se basan en desviaciones típicas de repetibilidad s_r .

4.2. Estudios de precisión del método de ensayo.

En este apartado se estudia en qué medida la colocación y el corte de la muestra de ensayo influyen en la repetibilidad de la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia y, por consiguiente, en la precisión del método de ensayo.

Puesto que la incertidumbre y la precisión están relacionadas, también se estudia en qué medida los posibles errores en la medida de la temperatura y la distancia entre micrófonos influyen en el coeficiente de absorción medido y en su incertidumbre asociada. Además, se lleva a cabo un estudio en el que se pretende determinar cuantas medidas de una misma muestra es aconsejable realizar, basándose en los valores de incertidumbre obtenidos.

Los resultados obtenidos en los estudios son analizados con el fin de conocer el grado de influencia de cada uno de los factores en la precisión del método de ensayo y en la incertidumbre de medida.

4.2.1. Influencia del número de mediciones en la incertidumbre de medida.

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.1. “Concepto de incertidumbre”, todo resultado obtenido en un ensayo viene condicionado por posibles componentes

de incertidumbre. Una de las componentes de incertidumbre es debida a la variabilidad aleatoria de una serie de mediciones (incertidumbre tipo A), la cual se reduce aumentando el número de mediciones. Por tanto, en cualquier ensayo de medida es de vital importancia llevar a cabo varias mediciones del parámetro objeto de medida y promediarlas con el fin de reducir el efecto de las variaciones aleatorias sobre el resultado de medida. Puesto que la norma UNE-EN ISO 10534-2 no especifica cuantas mediciones del coeficiente de absorción de una muestra es aconsejable realizar, este estudio pretende determinar cuántas mediciones son suficientes para reducir de manera significativa dicho efecto. Para ello, se analiza la influencia que tiene el número de mediciones en la incertidumbre expandida de medida U asociada al coeficiente de absorción acústica α .

El estudio se lleva a cabo en base a los datos obtenidos en cuatro ensayos, llevados a cabo en días distintos, correspondientes a dos muestras de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y dos muestras de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER. Realizando un análisis de los datos de cada ensayo se pretende llegar a una conclusión global independiente del tipo de material ensayado. De cada muestra de ensayo se realizaron cinco mediciones de la función de transferencia, extrayendo la muestra y volviéndola a introducir en el tubo de impedancia en cada medición. Se calculó la incertidumbre expandida U a partir de las funciones de transferencia medidas en frecuencias discretas (resolución en frecuencia de 25 Hz), según se indica en el apartado 3.3. “*Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo*”, para dos, tres, cuatro y cinco mediciones de la muestra de ensayo. Esto significa que de cada muestra de ensayo se calcularon cuatro valores de incertidumbre de medida correspondientes a las dos primeras mediciones, las tres primeras mediciones, las cuatro primeras mediciones y las cinco mediciones. De esta manera, se puede observar como varía el valor de la incertidumbre U a medida que se aumenta el número de mediciones. En función de esas variaciones se pretende determinar, en la medida de lo posible, cuantas medidas de la misma muestra de ensayo son suficientes realizar con este método de ensayo.

Las Figuras 4.3 y 4.4 representan gráficamente los valores de incertidumbre expandida, para cada número de medidas, asociados al α de las muestras 1 y 2 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL, respectivamente.

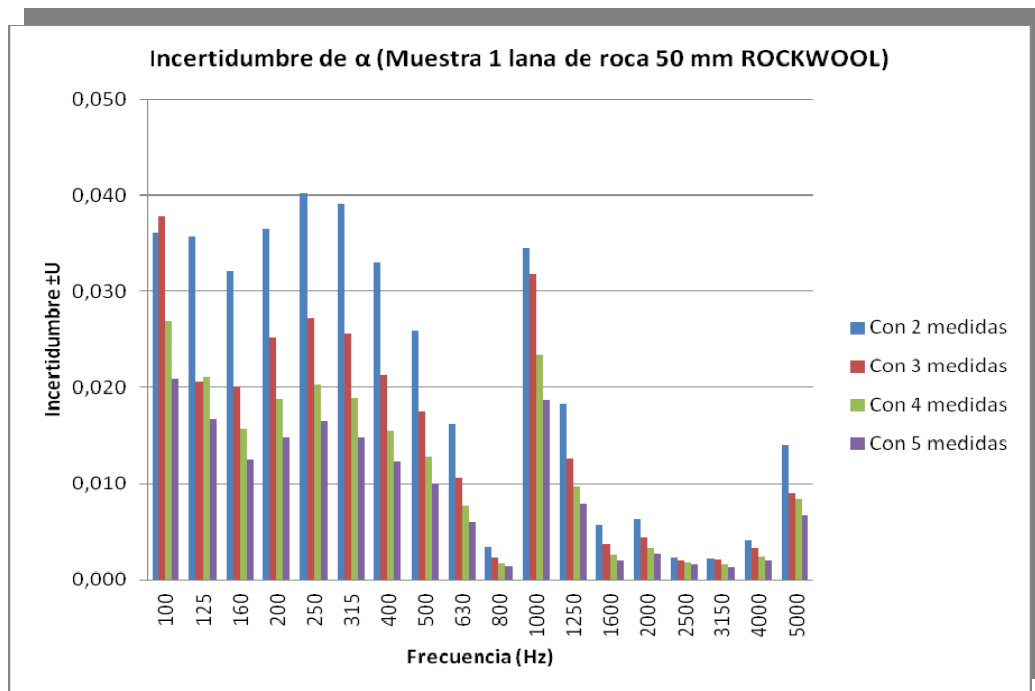


Figura 4.3 Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 1 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.

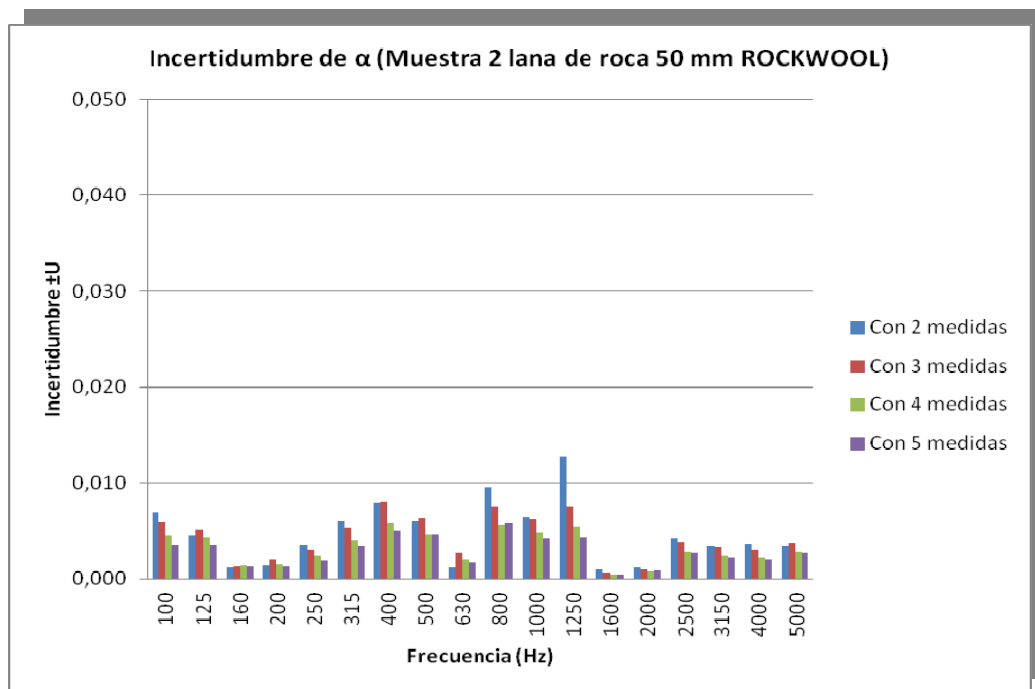


Figura 4.4 Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 2 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.

Las Figuras 4.5 y 4.6 representan gráficamente los valores de incertidumbre expandida, para cada número de medidas, asociados al α de las muestras 1 y 2 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER, respectivamente.

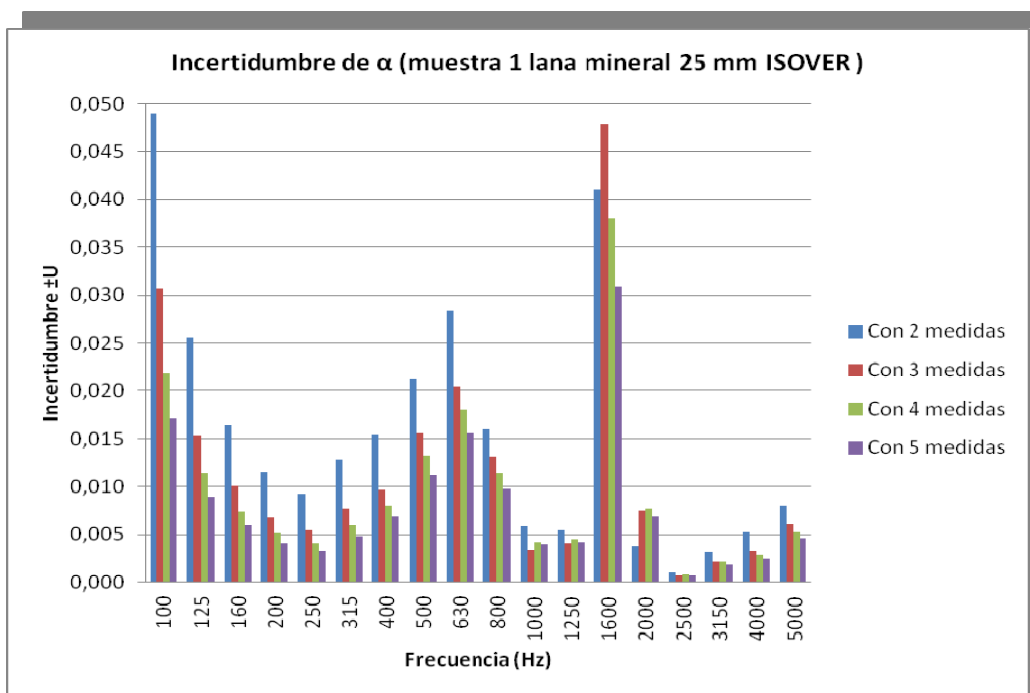


Figura 4.5 Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 1 de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 mm de ISOVER.

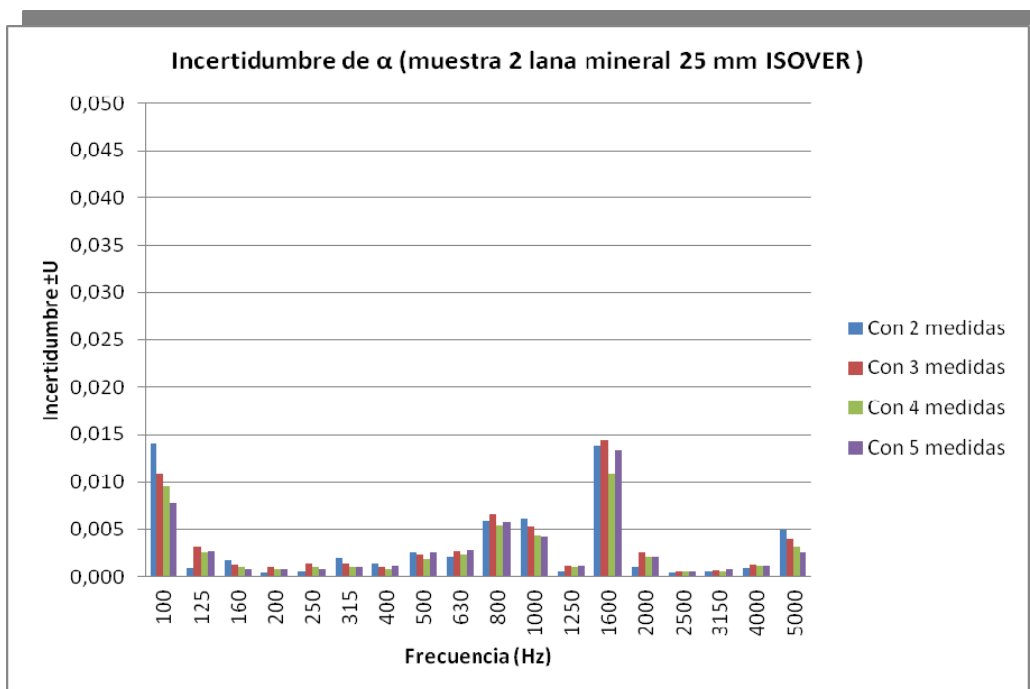


Figura 4.6 Incertidumbres de α correspondientes a la muestra 2 de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 mm de ISOVER.

En los resultados correspondientes a la muestra 1 de lana de roca de ROCKWOOL (Figura 4.3) y a la muestra 1 de lana mineral CLIMAVÉR NETO de ISOVER (Figura 4.5) se observa que, salvo alguna banda de frecuencia aislada, la

incertidumbre disminuye a medida que aumenta el número de mediciones realizadas (sobre todo, hasta el tercio de octava de 1250 Hz) debido a que se reduce la desviación típica de la media (incertidumbre tipo A). La desviación típica de la media se calcula dividiendo la desviación típica de las medidas entre \sqrt{N} , siendo N , el número de medidas. Cuanto mayor es N , menor es la desviación típica de la media, es decir, menor es la incertidumbre tipo A.

Sin embargo, en los resultados correspondientes a la muestra 2 de lana de roca de ROCKWOOL (Figura 4.4) y a la muestra 2 de lana mineral CLIMAVER NETO de ISOVER (Figura 4.6) apenas se aprecian variaciones de la incertidumbre en función del número de mediciones. Esto es debido a que la desviación típica entre las cinco medidas de cada muestra es pequeña, lo cual se traduce en que la incertidumbre tipo A es prácticamente despreciable y, como consecuencia, la incertidumbre es principalmente debida a la incertidumbre tipo B que es independiente del número de mediciones.

Es importante destacar que los ensayos de la muestra 1 de cada material fueron de los primeros ensayos que se realizaron, por lo que no se tenía apenas experiencia en la aplicación del método de ensayo. Por el contrario, los ensayos de la muestra 2 de cada material fueron de los últimos ensayos en realizarse y ya se disponía de cierta experiencia en la aplicación del método. Por consiguiente, la falta de experiencia del técnico en la aplicación del método de ensayo puede ser la principal causa de que los valores de incertidumbre de la muestra 1 de cada material sean más elevados, puesto que esta falta de experiencia puede provocar que la desviación típica entre las medidas sea mayor debido a una mala ejecución del procedimiento. Esto demuestra que la experiencia del técnico también es un factor influyente en la incertidumbre de medida y en la precisión de la aplicación del método de ensayo.

Analizando los resultados de los ensayos con mayor incertidumbre (Figuras 4.3 y 4.5) se puede observar que tres mediciones son suficientes, aunque se mejoraría levemente con cuatro. Más de cuatro medidas es innecesario puesto que la disminución es muy pequeña. A pesar de que en los ensayos de la muestra 2 de cada material la incertidumbre no varía con el número de medidas (Figuras 4.4 y 4.6), siempre es aconsejable realizar más de una medida y más teniendo en cuenta que en este método de ensayo se requiere poco tiempo para llevar a cabo cada medida. Realizando una visión global de los resultados se puede concluir que tres mediciones son suficientes. Por tanto, este estudio revela la importancia de repetir las medidas de

la misma muestra de ensayo al menos tres veces, sobre todo si no se dispone de experiencia suficiente para llevar a cabo el método de ensayo bajo estudio.

4.2.2. Influencia de la colocación de la muestra en la repetibilidad del método de ensayo.

Puesto que la repetibilidad de un método es un indicativo de la precisión del mismo, existe la necesidad de estudiar la influencia de diferentes factores en la repetibilidad del método de ensayo. En este estudio se pretende analizar el grado de influencia de la colocación de la muestra de ensayo en el portamuestras sobre la repetibilidad del método.

El estudio se realiza en base a los datos obtenidos en cuatro ensayos, correspondientes a dos muestras de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y dos muestras de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 *mm* de espesor de ISOVER. Mediante el análisis de los datos de cada ensayo se pretende llegar a una conclusión global para ambos materiales.

De cada una de las muestras de ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia, extrayendo la muestra y volviéndola a introducir en el tubo de impedancia en cada medición. Una vez realizadas las medidas, se determinaron los tres coeficientes de absorción acústica de cada muestra y se calculó la desviación típica de repetibilidad entre ellos. En cada ensayo las condiciones de medida y la muestra de ensayo no variaron, la única variación consistió en cómo se colocaba la muestra en el portamuestras para cada medida. Por consiguiente, la dispersión entre los tres coeficientes de absorción acústica de la misma muestra de ensayo se puede considerar provocada principalmente por la colocación de la muestra.

La Tabla 4.1 contiene los valores de los coeficientes de absorción α de cada una de las tres mediciones, la desviación típica de repetibilidad s_r y el límite de repetibilidad r , del ensayo de la muestra 1 de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL.

Frecuencia (Hz)	$\alpha_{_1}$	$\alpha_{_2}$	$\alpha_{_3}$	s_r	r
100	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
125	0,01	0,02	0,03	0,007	0,019
160	0,12	0,13	0,13	0,004	0,011
200	0,19	0,19	0,20	0,003	0,008
250	0,31	0,31	0,31	0,003	0,008
315	0,46	0,47	0,47	0,003	0,008
400	0,57	0,57	0,57	0,003	0,007
500	0,66	0,67	0,67	0,002	0,007
630	0,73	0,73	0,73	0,001	0,003
800	0,78	0,80	0,80	0,013	0,037
1000	0,91	0,90	0,90	0,004	0,012
1250	0,88	0,88	0,88	0,001	0,002
1600	0,88	0,88	0,88	0,001	0,002
2000	0,89	0,89	0,89	0,000	0,001
2500	0,92	0,92	0,92	0,000	0,001
3150	0,93	0,94	0,94	0,001	0,002
4000	0,95	0,95	0,95	0,000	0,000
5000	0,97	0,97	0,97	0,000	0,001

Tabla 4.1 Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 1 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.

La Tabla 4.2 muestra los valores de los coeficientes de absorción α de cada una de las tres mediciones, la desviación típica de repetibilidad s_r y el límite de repetibilidad r , del ensayo de la muestra 2 de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL.

Frecuencia (Hz)	α_1	α_2	α_3	s_r	r
100	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
125	0,04	0,03	0,03	0,004	0,012
160	0,13	0,13	0,13	0,002	0,005
200	0,19	0,19	0,19	0,003	0,008
250	0,31	0,30	0,30	0,004	0,012
315	0,46	0,45	0,45	0,004	0,012
400	0,56	0,56	0,56	0,004	0,012
500	0,67	0,66	0,66	0,004	0,011
630	0,75	0,74	0,75	0,003	0,007
800	0,80	0,80	0,80	0,003	0,008
1000	0,85	0,86	0,86	0,003	0,009
1250	0,91	0,91	0,91	0,000	0,001
1600	0,90	0,90	0,90	0,001	0,002
2000	0,91	0,91	0,91	0,000	0,001
2500	0,93	0,93	0,93	0,000	0,001
3150	0,95	0,94	0,95	0,000	0,001
4000	0,95	0,95	0,95	0,000	0,000
5000	0,97	0,97	0,97	0,000	0,001

Tabla 4.2 Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 2 de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.

La Tabla 4.3 contiene los valores de los coeficientes de absorción α de cada una de las tres mediciones, la desviación típica de repetibilidad s_r y el límite de repetibilidad r , correspondientes al ensayo de la muestra 1 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER.

Frecuencia (Hz)	α_1	α_2	α_3	s_r	r
100	0,00	0,01	0,02	0,011	0,030
125	0,00	0,00	0,01	0,004	0,011
160	0,00	0,01	0,01	0,003	0,007
200	0,01	0,02	0,02	0,003	0,009
250	0,03	0,04	0,04	0,003	0,008
315	0,08	0,08	0,08	0,003	0,007
400	0,13	0,13	0,14	0,001	0,004
500	0,22	0,22	0,22	0,001	0,004
630	0,35	0,35	0,35	0,001	0,003
800	0,51	0,51	0,51	0,001	0,002
1000	0,66	0,66	0,66	0,001	0,002
1250	0,79	0,79	0,80	0,002	0,004
1600	0,91	0,91	0,91	0,001	0,003
2000	0,97	0,97	0,97	0,001	0,001
2500	0,98	0,98	0,98	0,000	0,000
3150	0,96	0,96	0,96	0,000	0,000
4000	0,95	0,95	0,95	0,000	0,001
5000	0,95	0,95	0,94	0,009	0,025

Tabla 4.3 Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 1 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER.

La Tabla 4.4 contiene los valores de los coeficientes de absorción α de cada una de las tres mediciones, la desviación típica de repetibilidad s_r y el límite de repetibilidad r , del ensayo de la muestra 2 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER.

Frecuencia (Hz)	α_1	α_2	α_3	s_r	r
100	0,01	0,02	0,02	0,007	0,020
125	0,00	0,01	0,01	0,005	0,013
160	0,00	0,01	0,01	0,003	0,009
200	0,01	0,02	0,02	0,003	0,009
250	0,02	0,03	0,03	0,003	0,007
315	0,06	0,06	0,07	0,002	0,006
400	0,11	0,11	0,11	0,001	0,003
500	0,19	0,19	0,19	0,002	0,005
630	0,31	0,31	0,31	0,001	0,001
800	0,46	0,46	0,46	0,000	0,001
1000	0,62	0,62	0,62	0,000	0,001
1250	0,77	0,77	0,77	0,002	0,005
1600	0,89	0,89	0,89	0,002	0,004
2000	0,95	0,95	0,95	0,000	0,000
2500	0,98	0,98	0,98	0,000	0,001
3150	0,99	0,99	0,99	0,000	0,000
4000	0,97	0,97	0,97	0,000	0,000
5000	0,96	0,97	0,97	0,003	0,009

Tabla 4.4 Coeficientes de absorción y repetibilidad de las tres medidas de la muestra 2 de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER.

En general, la desviación típica de repetibilidad entre medidas de la misma muestra es inferior a 0,007 en todo el rango de frecuencia (véase Figura 4.7), lo cual revela que la precisión de las medidas es elevada y, por consiguiente, la influencia de la colocación de la muestra en la repetibilidad del método de ensayo es pequeña. Esta conclusión se basa en los ensayos de dos materiales, cuyas muestras son uniformes, por lo que solo se puede atribuir a este tipo de muestras y siempre que se coloquen de forma adecuada. Mediante este estudio no se puede conocer la influencia de la colocación de muestras con superficie irregular en la precisión del método, aunque se presupone algo mayor.

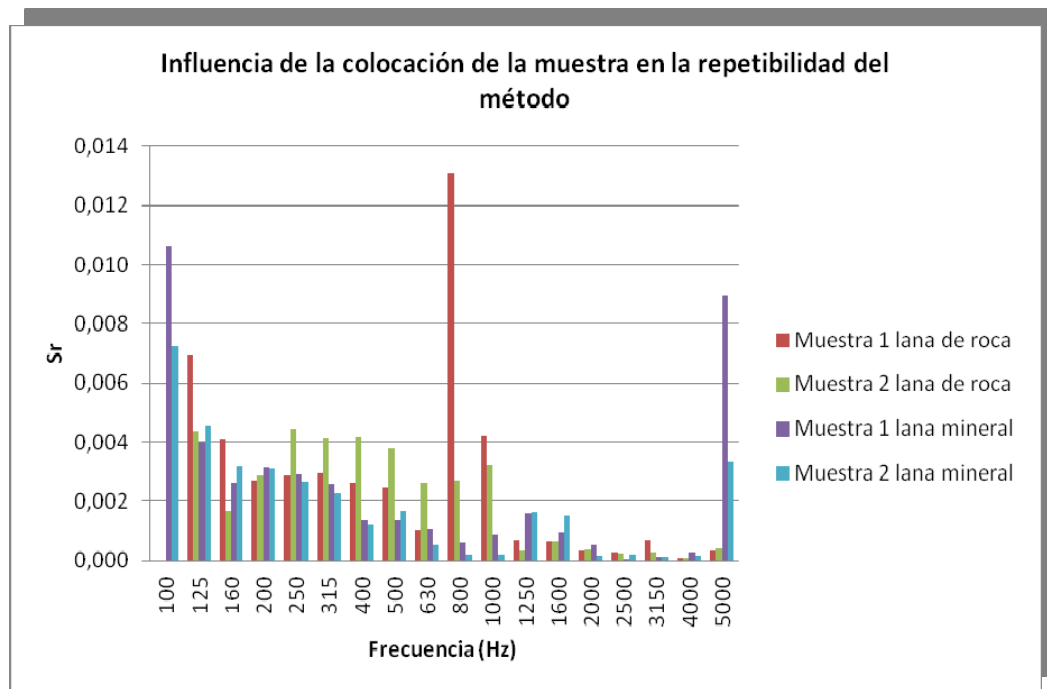


Figura 4.7 Desviaciones típicas de repetibilidad debidas a la colocación de la muestra.

Puesto que la dispersión entre medidas es posiblemente la componente más importante de la incertidumbre asociada al resultado del ensayo, es lógico que cuanto mayor sea la desviación estándar entre las medidas, mayor será la incertidumbre de medida asociada al resultado.

La Tabla 4.5 contiene los valores de la incertidumbre expandida U y desviación de repetibilidad s_r de cada ensayo con el fin de relacionar ambos parámetros.

Frecuencia (Hz)	Muestra 1 Lana de Roca ROCKWOOL		Muestra 2 Lana de Roca ROCKWOOL		Muestra 1 Lana mineral ISOVER		Muestra 2 Lana mineral ISOVER	
	$\pm U$	s_r	$\pm U$	s_r	$\pm U$	s_r	$\pm U$	s_r
100	0,007	0,000	0,004	0,000	0,008	0,011	0,005	0,007
125	0,004	0,007	0,006	0,004	0,005	0,004	0,003	0,005
160	0,003	0,004	0,005	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003
200	0,002	0,003	0,006	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003
250	0,003	0,003	0,007	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003
315	0,003	0,003	0,006	0,004	0,002	0,003	0,002	0,002
400	0,003	0,003	0,005	0,004	0,002	0,001	0,002	0,001
500	0,003	0,002	0,004	0,004	0,002	0,001	0,002	0,002
630	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001
800	0,020	0,013	0,002	0,003	0,001	0,001	0,001	0,000
1000	0,007	0,004	0,008	0,003	0,001	0,001	0,001	0,000
1250	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	0,001	0,002
1600	0,000	0,001	0,001	0,001	0,006	0,001	0,006	0,002
2000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
2500	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3150	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000
5000	0,003	0,000	0,002	0,000	0,010	0,009	0,008	0,003

Tabla 4.5 Incertidumbres y desviaciones típicas de repetibilidad correspondientes a las tres medidas de cada muestra de ensayo.

En la Tabla 4.5 se observa que los rangos de frecuencia con mayor desviación típica de repetibilidad, generalmente coinciden con los de mayor incertidumbre de medida, tal y como se preveía. Es importante destacar que el cálculo de la incertidumbre U asociada al resultado del ensayo se realiza a partir de las funciones de transferencia medidas en frecuencias discretas (datos primarios), mientras que la desviación típica de repetibilidad s_r se calcula a partir de los coeficientes de absorción acústica en tercios de octava (datos finales). Esto significa que los valores de incertidumbre de medida calculados a partir de datos primarios son coherentes con las desviaciones de los resultados finales obtenidos.

4.2.3. Influencia del corte de la muestra en la repetibilidad del método de ensayo.

Otro de los factores que puede afectar a la repetibilidad del método es el corte de la muestra de ensayo. El corte de cada muestra no es igual al del resto de

muestras puesto que siempre existe algún pequeño matiz que las diferencia. En este estudio se pretende analizar el grado de influencia del proceso de corte de las muestras de ensayo sobre la repetibilidad de los resultados del método.

El estudio se lleva a cabo en base a los datos obtenidos en ocho ensayos, correspondientes a cuatro muestras de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652 (Figura 4.8), y cuatro muestras de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 *mm* de espesor de ISOVER (Figura 4.9). Mediante el análisis de los datos de los cuatro ensayos de cada material se pretende llegar a una conclusión global independiente del tipo de material ensayado.

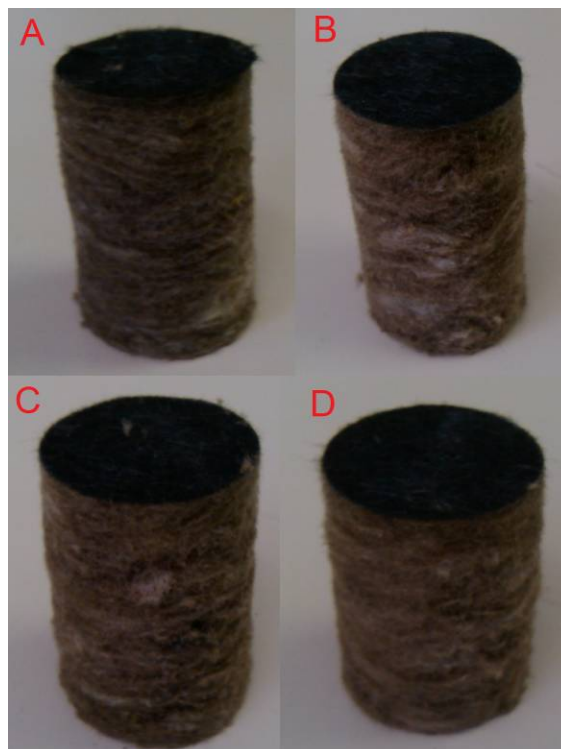


Figura 4.8 Muestras de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL.

A) Muestra 1, B) Muestra 2, C) Muestra 3 y D) Muestra 4.

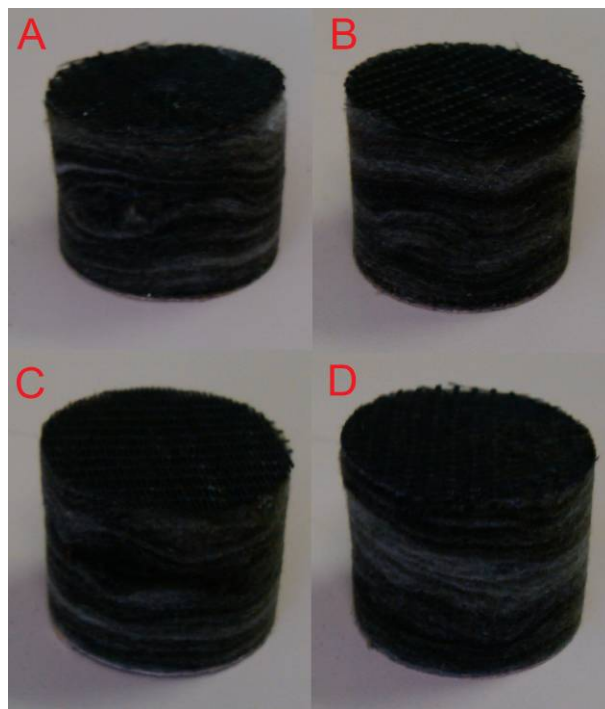


Figura 4.9 Muestras de lana mineral de 25 mm de espesor de ISOVER.

A) Muestra 1, B) Muestra 2, C) Muestra 3 y D) Muestra 4.

De cada muestra de ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia, extrayendo la muestra y volviéndola a introducir en el tubo de impedancia en cada medición. A partir de las funciones de transferencia se determinaron los tres coeficientes de absorción acústica y se promediaron para obtener el coeficiente de absorción de la muestra. Por lo tanto, se dispuso de cuatro coeficientes de absorción por material, uno por muestra ensayada. Finalmente, se calculó la desviación típica de repetibilidad.

Entre ensayos del mismo material las condiciones de medida no variaron, salvo la temperatura que lo hizo levemente. No obstante, tal y como se demuestra en el estudio del apartado 4.2.4. “*Relevancia de posibles desviaciones en la medida de la temperatura*” del presente trabajo, pequeñas variaciones de la temperatura no provocan modificaciones del coeficiente de absorción. Sin embargo, la muestra bajo estudio era distinta en cada ensayo. Por consiguiente, la variabilidad entre los cuatro coeficientes de absorción acústica del mismo material, se puede considerar provocada principalmente por el proceso de corte de las respectivas muestras.

La Tabla 4.6 contiene los valores de la desviación típica de repetibilidad s_r y del límite de repetibilidad r correspondientes a los coeficientes de absorción de las

cuatro muestras de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL. El coeficiente de absorción acústica de cada muestra es el promedio de las tres medidas realizadas.

Frecuencia (Hz)	α (Muestra 1)	α (Muestra 2)	α (Muestra 3)	α (Muestra 4)	s_r	r
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
125	0,00	0,02	0,03	0,04	0,016	0,044
160	0,10	0,13	0,13	0,13	0,015	0,042
200	0,16	0,19	0,19	0,19	0,015	0,041
250	0,28	0,31	0,30	0,31	0,014	0,038
315	0,44	0,47	0,45	0,45	0,010	0,029
400	0,55	0,57	0,56	0,56	0,007	0,020
500	0,67	0,66	0,66	0,65	0,007	0,018
630	0,76	0,73	0,75	0,73	0,013	0,036
800	0,83	0,79	0,80	0,76	0,031	0,086
1000	0,91	0,90	0,86	0,91	0,025	0,069
1250	0,93	0,88	0,91	0,88	0,022	0,062
1600	0,92	0,88	0,90	0,88	0,016	0,044
2000	0,92	0,89	0,91	0,90	0,010	0,027
2500	0,93	0,92	0,93	0,92	0,008	0,021
3150	0,94	0,94	0,95	0,93	0,006	0,016
4000	0,96	0,95	0,95	0,94	0,007	0,019
5000	0,98	0,97	0,97	0,97	0,005	0,013

Tabla 4.6 Desviación típica de repetibilidad y límite de repetibilidad de las cuatro muestras de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL.

La Tabla 4.7 muestra la desviación típica de repetibilidad s_r y el límite de repetibilidad r correspondiente a los coeficientes de absorción de las cuatro muestras de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER. El coeficiente de absorción acústica de cada muestra es el promedio de las tres medidas realizadas.

Frecuencia (Hz)	α (Muestra 1)	α (Muestra 2)	α (Muestra 3)	α (Muestra 4)	s_r	r
100	0,00	0,00	0,02	0,01	0,008	0,023
125	0,00	0,00	0,01	0,00	0,003	0,007
160	0,00	0,00	0,00	0,00	0,003	0,007
200	0,00	0,00	0,01	0,02	0,009	0,026
250	0,01	0,00	0,03	0,03	0,014	0,039
315	0,08	0,10	0,06	0,08	0,015	0,042
400	0,14	0,20	0,11	0,13	0,039	0,110
500	0,23	0,31	0,19	0,22	0,052	0,146
630	0,34	0,42	0,31	0,35	0,048	0,135
800	0,46	0,52	0,46	0,51	0,032	0,089
1000	0,59	0,62	0,62	0,66	0,027	0,076
1250	0,73	0,72	0,77	0,79	0,033	0,093
1600	0,84	0,85	0,89	0,91	0,033	0,091
2000	0,95	0,97	0,95	0,97	0,011	0,032
2500	0,99	1,00	0,98	0,98	0,007	0,020
3150	0,99	0,99	0,99	0,96	0,014	0,039
4000	0,97	0,95	0,97	0,95	0,012	0,032
5000	0,97	0,97	0,97	0,95	0,011	0,030

Tabla 4.7 Desviación típica de repetibilidad y límite de repetibilidad de las cuatro muestras de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER.

La Figura 4.10 representa las s_r obtenidas para cada tipo de material.

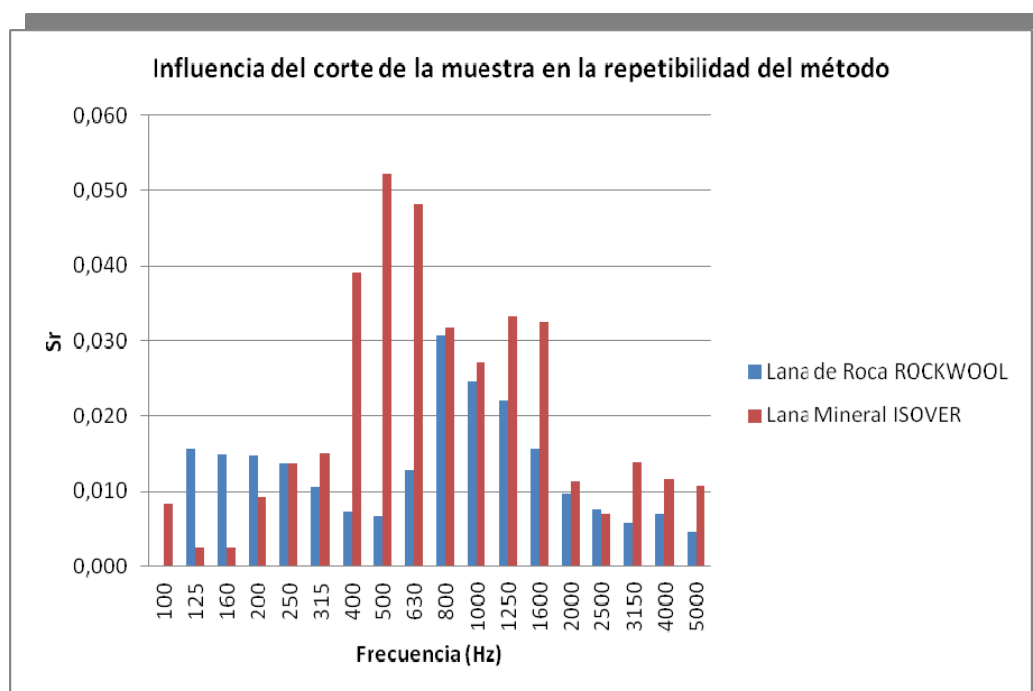


Figura 4.10 Desviaciones de repetibilidad debidas al corte de la muestra.

Antes de analizar las desviaciones de repetibilidad entre los resultados de los ensayos realizados para este estudio, es importante remarcar que dichas desviaciones son compatibles con los valores medios de repetibilidad determinados en la intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 (véase Tabla 4.8). Por tanto, son una base fiable para poder evaluar la influencia del proceso de corte de las muestras en la precisión del método.

Frecuencia (Hz)	Lana de Roca 50 mm ROCKWOOL		Lana mineral 25 mm ISOVER	
	s_r	s_r (Intercomp.)	s_r	s_r (Intercomp.)
100	0,000	0,009	0,008	0,010
125	0,016	0,013	0,003	0,004
160	0,015	0,013	0,003	0,003
200	0,015	0,017	0,009	0,005
250	0,014	0,024	0,014	0,006
315	0,010	0,028	0,015	0,010
400	0,007	0,034	0,039	0,018
500	0,007	0,024	0,052	0,027
630	0,013	0,011	0,048	0,036
800	0,031	0,022	0,032	0,030
1000	0,025	0,027	0,027	0,027
1250	0,022	0,025	0,033	0,024
1600	0,016	0,018	0,033	0,022
2000	0,010	0,014	0,011	0,015
2500	0,008	0,010	0,007	0,009
3150	0,006	0,007	0,014	0,014
4000	0,007	0,007	0,012	0,016
5000	0,005	0,008	0,011	0,011

Tabla 4.8 Desviación típica de repetibilidad de cada ensayo y repetibilidad media de la intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1.

En este estudio las desviaciones típicas son mayores que en el estudio anterior, lo cual hace indicar que el corte de las muestras provoca que la repetibilidad entre las medidas sea menor y, como consecuencia, la precisión del método también lo sea. Además, se observa que la influencia del corte es más evidente en el material de lana mineral de ISOVER que en el material de lana de roca de ROCKWOOL, entre los tercios de octava de 400 Hz y 630 Hz (Figura 4.10). Esto revela que el corte de las muestras puede afectar a la precisión de las medidas, en mayor o menor grado, según el tipo de material a ensayar. Finalmente, se puede concluir que el corte de la

muestra es un factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la precisión de este método de ensayo, puesto que es una fuente importante de incertidumbre.

Hasta ahora, se ha considerado que un ensayo consistía en estudiar una muestra de un material. Sin embargo, a la vista de las conclusiones obtenidas en este estudio, surge la necesidad de estudiar en un mismo ensayo varias muestras del mismo material, para así tener en cuenta la variabilidad producida por el corte de las muestras, puesto que el proceso de corte es una fase más del ensayo. De esta manera, la caracterización acústica de un material será más apropiada. La Norma UNE-EN ISO 10534-2 especifica que conviene ensayar dos muestras de un material, o más de dos si las muestras no son uniformes. Sin embargo, solo se trata de una recomendación, dejando a elección del técnico de laboratorio el número de muestras a ensayar. Para compensar el efecto del corte de las muestras en los resultados, la norma debería exigir un número mínimo de muestras a estudiar durante el ensayo de un material. En el presente trabajo se propone realizar el ensayo con, al menos, tres muestras del material, pudiendo ser más dependiendo de los valores de la incertidumbre.

Las incertidumbres calculadas hasta ahora tienen en cuenta la variabilidad producida por la colocación de la muestra pero no la producida por el corte, puesto que en cada ensayo solo se consideraba el estudio de una muestra de ensayo. Para incluir en la incertidumbre el efecto producido por el corte de las muestras se realizaron dos ensayos, en los cuales se estudiaron cuatro muestras del mismo material en cada ensayo. Un ensayo corresponde al material de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y el otro ensayo corresponde al material de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 *mm* de espesor de ISOVER. Se calculó la incertidumbre expandida U del resultado de cada ensayo a partir de las funciones de transferencia medidas en frecuencias discretas (resolución en frecuencia de 25 *Hz*), según se indica en el apartado 3.3. *“Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo”*. Ahora sí, la incertidumbre calculada tiene en cuenta la variabilidad producida por el corte de las muestras. Por otra parte, se calculó la desviación típica de repetibilidad s_r entre los coeficientes de absorción acústica en tercios de octava de las cuatro muestras de cada ensayo. El coeficiente de absorción acústica asignado a cada muestra es el promedio de tres medidas de la muestra. La Tabla 4.9 contiene el resultado de cada ensayo (α promedio de las cuatro muestras y su incertidumbre asociada) y compara la incertidumbre U y la desviación típica de repetibilidad s_r , ambas influenciadas por el corte de las muestras.

Frecuencia (Hz)	Lana de Roca 50 mm ROCKWOOL			Lana mineral 25 mm ISOVER		
	α	$\pm U$	s_r	α	$\pm U$	s_r
100	0,00	0,040	0,002	0,00	0,004	0,000
125	0,03	0,018	0,019	0,00	0,002	0,000
160	0,10	0,018	0,025	0,00	0,004	0,000
200	0,15	0,023	0,031	0,00	0,005	0,000
250	0,25	0,029	0,041	0,03	0,007	0,009
315	0,39	0,031	0,046	0,10	0,010	0,014
400	0,51	0,030	0,044	0,17	0,014	0,018
500	0,62	0,028	0,036	0,27	0,020	0,023
630	0,73	0,015	0,023	0,39	0,032	0,027
800	0,80	0,013	0,011	0,52	0,025	0,025
1000	0,84	0,019	0,018	0,64	0,016	0,023
1250	0,93	0,016	0,017	0,73	0,007	0,018
1600	0,92	0,008	0,020	0,83	0,030	0,029
2000	0,91	0,012	0,016	0,94	0,024	0,016
2500	0,91	0,013	0,007	0,99	0,010	0,014
3150	0,93	0,012	0,015	0,99	0,012	0,017
4000	0,95	0,008	0,014	0,97	0,009	0,014
5000	0,97	0,004	0,010	0,97	0,006	0,013

Tabla 4.9 Incertidumbres y desviaciones típicas de repetibilidad incluyendo el efecto producido por el corte de las muestras.

Al igual que ocurría en el estudio anterior (Tabla 4.5), los rangos de frecuencia con mayor desviación típica de repetibilidad, generalmente coinciden con los de mayor incertidumbre de medida. Como ya se comentó anteriormente, el cálculo de la incertidumbre U asociada al resultado del ensayo se realiza a partir de las funciones de transferencia medidas en frecuencias discretas (datos primarios), mientras que la desviación típica de repetibilidad s_r se calcula a partir de los coeficientes de absorción acústica en tercios de octava (datos finales). Esto significa que los valores de incertidumbre de medida calculados a partir de datos primarios, son coherentes con las desviaciones de los resultados finales obtenidos.

Además, según se observa en las Figuras 4.11 y 4.12, los valores de incertidumbre calculados en este estudio (Tabla 4.9) son coherentes con los valores de repetibilidad determinados en la intercomparación con materiales similares. Por tanto, la evaluación que se realiza de la incertidumbre es compatible con los resultados de repetibilidad obtenidos en la intercomparación.

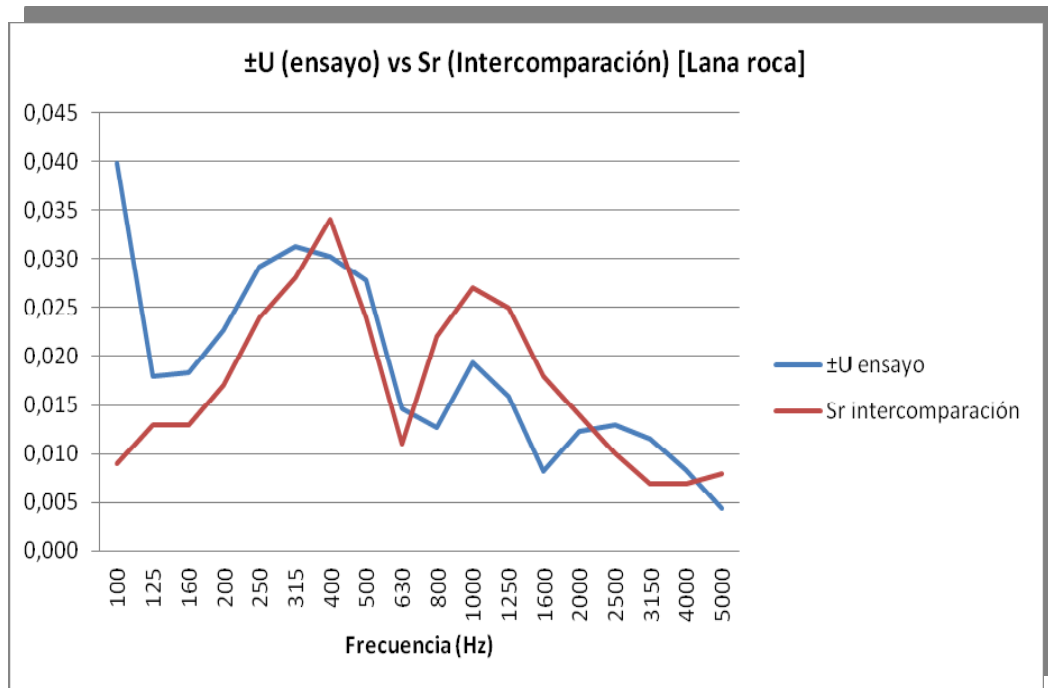


Figura 4.11 Comparación U del ensayo y s_r de la intercomparación del material de lana de roca de ROCKWOOL.

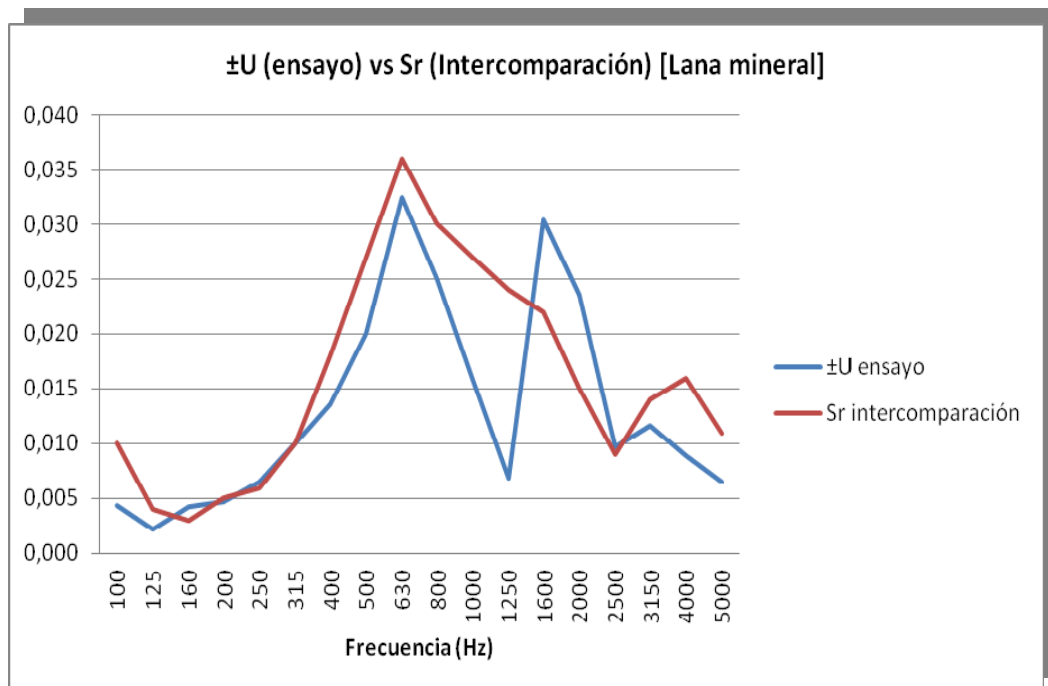


Figura 4.12 Comparación U del ensayo y s_r de la intercomparación del material de lana mineral de ISOVER.

4.2.4. Relevancia de posibles desviaciones en la medida de la temperatura durante un ensayo.

La temperatura, definida como T , es uno de los datos necesarios para determinar el coeficiente de absorción acústica de un material mediante este método de ensayo. Una de las mediciones de control que exige la norma UNE-EN ISO 10534-2 es medir la temperatura en el interior del tubo antes y después de cada ensayo mediante un instrumento con una precisión de al menos $\pm 0,5$ grados kelvin. El instrumento de medida de temperatura empleado durante los ensayos tiene una precisión de $\pm 0,05$ °C ya que la resolución del equipo es de 0,1 °C. Sin embargo, no está calibrado por lo que se desconoce si el valor de temperatura medido tiene algún sesgo. Como consecuencia de este desconocimiento, surgió la idea de llevar a cabo este estudio para analizar las consecuencias de posibles desviaciones del valor medido de la temperatura con respecto al valor real, tanto en la determinación del coeficiente de absorción acústica como en su incertidumbre.

El estudio se realiza en base a los datos obtenidos en dos ensayos, uno de ellos con una muestra de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y el otro con una muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER. En cada ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia. Por un lado, se estudia la influencia de posibles desviaciones en la medida de la temperatura sobre el valor del coeficiente de absorción acústica. Para ello, se determinó el coeficiente de absorción acústica correspondiente a una de las funciones de transferencia medidas, empleando distintos valores de T , según el intervalo de variación estudiado. Por otro lado, se calculó la incertidumbre de medida asociada al resultado de cada ensayo con los mismos intervalos de variación de T . De esta manera, se pueden observar las variaciones del coeficiente de absorción y la incertidumbre a medida que aumenta la desviación cometida en la medida de la temperatura con respecto al valor real. Finalmente, en base a esas variaciones se determina la influencia de posibles desviaciones en la medida de la temperatura en los resultados del ensayo y, como consecuencia, en la precisión del método de ensayo.

La temperatura medida durante el ensayo de la muestra de lana de roca de ROCKWOOL fue 24,3 °C y durante el ensayo de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de ISOVER fue 25,5 °C. Los intervalos de variación supuestos del valor de temperatura medido son $\pm 0,5$ °C, ± 1 °C, ± 2 °C y ± 4 °C.

4.2.4.1. En la determinación del coeficiente de absorción acústica.

En este apartado se determinó el coeficiente de absorción acústica de cada muestra de ensayo para diferentes valores de temperatura T , dependiendo del intervalo de variación supuesto. Para calcular el coeficiente de absorción a partir de la función de transferencia medida, se utilizó un procedimiento de cálculo ejecutado en Excel basado en la norma UNE-EN ISO 10534-2 (véase ANEXO C). En primer lugar, se calculó el coeficiente de absorción acústica con el valor de T medido y, posteriormente, con los valores de T correspondientes a las mayores desviaciones de cada intervalo.

La Tabla 4.10 presenta los coeficientes de absorción de la muestra de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, calculados con distintos valores de temperatura.

Frecuencia (Hz)	α $T=24,3^\circ$	$T\pm 0,5^\circ$		$T\pm 1^\circ$		$T\pm 2^\circ$		$T\pm 4^\circ$	
		α $T=23,8^\circ$	α $T=24,8^\circ$	α $T=23,3^\circ$	α $T=25,3^\circ$	α $T=22,3^\circ$	α $T=26,3^\circ$	α $T=20,3^\circ$	α $T=28,3^\circ$
100	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
125	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
160	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
200	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
250	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
315	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
400	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
500	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
630	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,77	0,76
800	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
1000	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
1250	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
1600	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
2000	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
2500	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
3150	0,94	0,94	0,94	0,95	0,94	0,95	0,94	0,95	0,94
4000	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
5000	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

Tabla 4.10 Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana de roca de 50 *mm* de ROCKWOOL con distintos valores de T .

La Tabla 4.11 presenta los coeficientes de absorción de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER, calculados con distintos valores de temperatura.

Frecuencia (Hz)	α $T=25,5^\circ$	$T\pm 0,5^\circ$		$T\pm 1^\circ$		$T\pm 2^\circ$		$T\pm 4^\circ$	
		α $T=25,0^\circ$	α $T=26,0^\circ$	α $T=24,5^\circ$	α $T=26,5^\circ$	α $T=23,5^\circ$	α $T=27,5^\circ$	α $T=21,5^\circ$	α $T=29,5^\circ$
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
125	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
160	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
200	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
250	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
315	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16
400	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
500	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
630	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,36	0,37	0,36
800	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
1000	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,60	0,59
1250	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
1600	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
2000	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
2500	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
3150	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
4000	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
5000	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98	0,97	0,98	0,97	0,98

Tabla 4.11 Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER con distintos valores de T .

Los resultados reflejan que ciertas desviaciones en la medida de la temperatura no afectan al valor del coeficiente de absorción determinado. Tal y como muestra la Figura 4.13, incluso suponiendo desviaciones de hasta $4^\circ C$, apenas se observan variaciones del coeficiente de absorción de 0,01 en alguna banda aislada.

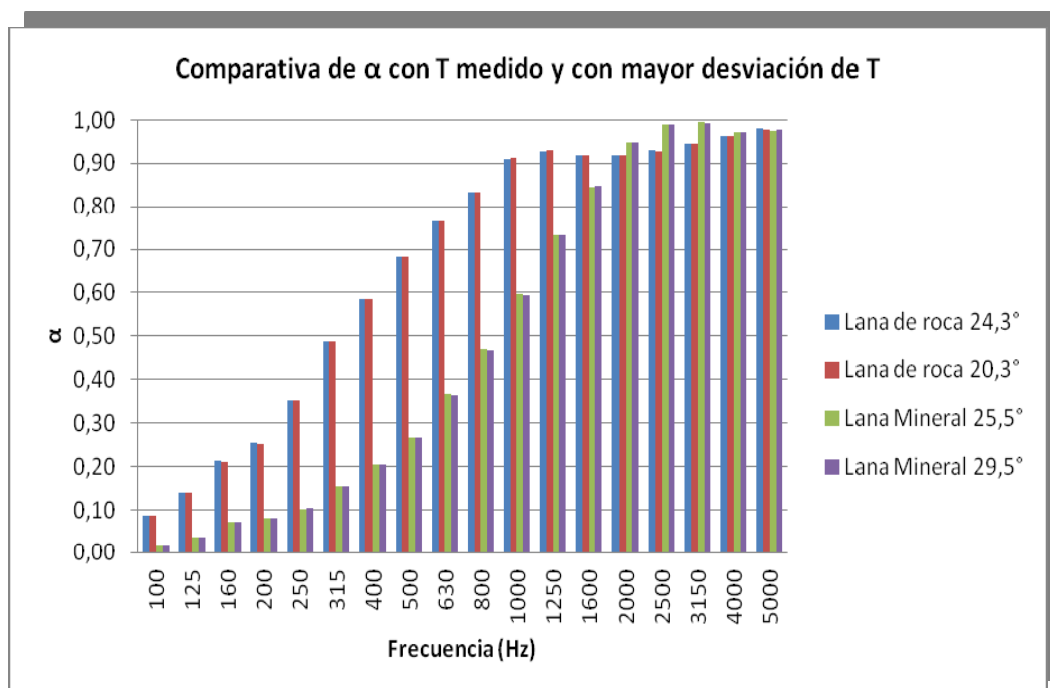


Figura 4.13 Comparativa de valores de α con T medido y con mayor desviación de T .

Con este estudio se puede concluir que la precisión de este método de ensayo no está condicionada por posibles desviaciones en la medida de la temperatura. Esta conclusión es válida para condiciones ambientales de laboratorio normales, en torno a los $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mediante este estudio no se puede afirmar que desviaciones en la temperatura en condiciones ambientales extremas (por ejemplo, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) no influyen en la determinación del coeficiente de absorción acústica.

4.2.4.2. En la determinación de la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción acústica.

En este apartado se determinó la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción obtenido en cada ensayo para diferentes intervalos de variación de la temperatura T . Se calculó la incertidumbre expandida U de cada muestra de ensayo a partir de las tres funciones de transferencia medidas en frecuencias discretas (resolución en frecuencia de 25 Hz), según se indica en el apartado 3.3. “Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo”. En el cálculo de la incertidumbre según el método de Monte Carlo, la temperatura es un parámetro de entrada cuya función de densidad de probabilidad es rectangular. Para que el algoritmo genere la distribución rectangular se deben introducir los extremos del intervalo de la distribución calculados a partir del valor medido y desviación máxima

asignada. Por lo tanto, se fueron modificando los extremos del intervalo en función de la desviación que se quería asignar a la medida de la temperatura. Como es lógico, cuanto mayor es la desviación aplicada, mayor es la amplitud del intervalo de la distribución rectangular. De esta manera, se obtuvo una incertidumbre de medida para cada uno de los intervalos de variación asignados a la medida de la temperatura.

La Tabla 4.12 muestra las incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL con distintos intervalos de variación de T . La primera columna de incertidumbre fue calculada teniendo sólo en cuenta la máxima variación posible atribuida a la resolución del equipo de medida, es decir, una variación de $\pm 0,05$ °C ya que la resolución del equipo es de 0,1 °C.

Frecuencia (Hz)	$\pm U (T \pm 0,05^\circ)$	$\pm U (T \pm 0,5^\circ)$	$\pm U (T \pm 1^\circ)$	$\pm U (T \pm 2^\circ)$	$\pm U (T \pm 4^\circ)$
100	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
125	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
160	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003
200	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
250	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
315	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
400	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
500	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
630	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
800	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006
1000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
1250	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
1600	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
2000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
2500	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
3150	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
4000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
5000	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004

Tabla 4.12 Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL con distintos intervalos de variación de T .

La Tabla 4.13 contiene las incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 mm de espesor de ISOVER con distintos intervalos de variación de T . Al igual que en la Tabla 4.12, la primera columna de incertidumbre fue calculada teniendo sólo en cuenta la máxima variación posible atribuida a la resolución del equipo de medida.

Frecuencia (Hz)	$\pm U (T \pm 0,05^\circ)$	$\pm U (T \pm 0,5^\circ)$	$\pm U (T \pm 1^\circ)$	$\pm U (T \pm 2^\circ)$	$\pm U (T \pm 4^\circ)$
100	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
125	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
160	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
200	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
250	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
315	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
400	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
500	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
630	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
800	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
1000	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
1250	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
1600	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
2000	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
2500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
3150	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
4000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
5000	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006

Tabla 4.13 Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER con distintos intervalos de variación de T .

Al aumentar el intervalo de variación de T se puede decir que la incertidumbre permanece constante, puesto que el aumento es despreciable y sólo sucede en algunas bandas de frecuencia. El mayor incremento de incertidumbre se produce en la banda de frecuencia de 5000 Hz, sin embargo, este incremento es pequeño comparado con la gran desviación asignada ($\pm 4^\circ C$). En conclusión, el estudio revela que desviaciones en la medida de la temperatura no tienen influencia en la determinación de la incertidumbre de medida, solo cometiendo desviaciones de 4 grados o más en la medida de la temperatura, lo cual es improbable, es apreciable un aumento de la incertidumbre de medida en la banda de 5000 Hz (véase Figura 4.14). Esta conclusión es válida para condiciones ambientales de laboratorio normales, en torno a los $24^\circ C$. Mediante este estudio no se puede afirmar que desviaciones en la temperatura en condiciones ambientales extremas (por ejemplo, $5^\circ C$ o $35^\circ C$) no influyen en el cálculo de la incertidumbre de medida.

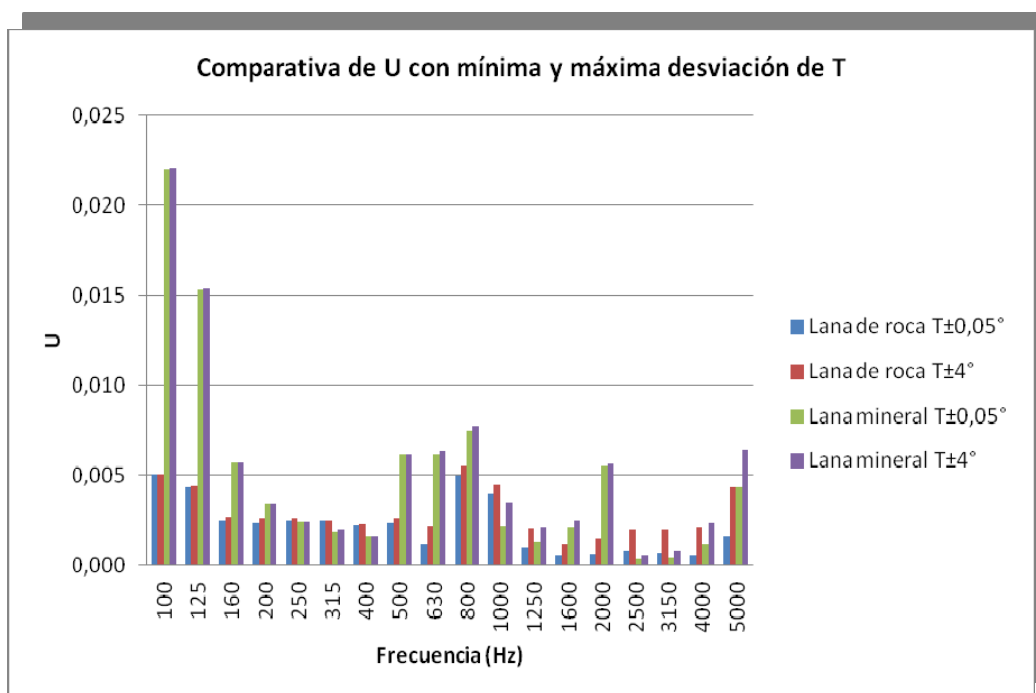


Figura 4.14 Comparativa de valores de U con mínima y máxima desviación de T .

4.2.5. Relevancia de posibles desviaciones en la medida de la distancia entre los micrófonos.

La distancia entre los micrófonos s es otro de los datos necesarios para determinar el coeficiente de absorción acústica de un material mediante este método de ensayo. La norma UNE-EN ISO 10534-2 indica que todas las posiciones fijas de los micrófonos deben conocerse con una precisión de al menos $\pm 0,2 \text{ mm}$. En el caso de no disponer del dato es necesario medir dicha distancia, pudiéndose cometer alguna desviación en la medida puesto que no es del todo evidente entre qué puntos realizarla. Este estudio pretende evaluar las consecuencias sobre el resultado de un ensayo, debidas a desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos s .

El estudio se lleva a cabo en base a los datos obtenidos en dos ensayos (los mismos que se emplearon en el estudio anterior), uno de ellos con una muestra de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652, y el otro con una muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER. En cada ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia. Por un lado, se estudia la influencia de posibles desviaciones en la medida de la distancia entre los micrófonos sobre el valor del coeficiente de absorción acústica. Para ello, se determinó el coeficiente de absorción acústica correspondiente a una de las funciones de

transferencia medidas, empleando distintos valores de s , según el intervalo de variación estudiado. Por otro lado, se calculó la incertidumbre de medida asociada al resultado de cada ensayo con los mismos intervalos de variación de s . De esta manera, se pueden observar las variaciones del coeficiente de absorción y la incertidumbre a medida que aumenta la desviación cometida en la medida de la distancia s con respecto al valor real. Finalmente, en base a esas variaciones se determina la influencia de posibles desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos en los resultados del ensayo y, como consecuencia, en la precisión del método de ensayo.

La distancia entre los micrófonos proporcionada por el fabricante es $0,0286\text{ m}$ mientras que los intervalos de variación supuestos son $\pm 0,0005\text{ m}$, $\pm 0,001\text{ m}$, $\pm 0,002\text{ m}$.

4.2.5.1. En la determinación del coeficiente de absorción acústica.

En este apartado se determinó el coeficiente de absorción acústica de cada muestra de ensayo para diferentes valores de s , dependiendo del intervalo de variación supuesto. Para calcular el coeficiente de absorción a partir de la función de transferencia medida, se utilizó un procedimiento de cálculo ejecutado en Excel basado en la norma UNE-EN ISO 10534-2 (véase ANEXO C). En primer lugar, se calculó el coeficiente de absorción acústica con el valor de s proporcionado por el fabricante y, posteriormente, con los valores de s correspondientes a las mayores desviaciones de cada intervalo.

La Tabla 4.14 presenta los coeficientes de absorción de la muestra de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, calculados con distintos valores de distancia entre micrófonos s .

Frecuencia (Hz)	α $s=0,0286$ m	$s \pm 0,0005$ m		$s \pm 0,001$ m		$s \pm 0,002$ m	
		α $s=0,0281$ m	α $s=0,0291$ m	α $s=0,0276$ m	α $s=0,0296$ m	α $s=0,0266$ m	α $s=0,0306$ m
100	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
125	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,13
160	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,22	0,20
200	0,25	0,26	0,25	0,26	0,25	0,26	0,24
250	0,35	0,35	0,35	0,36	0,35	0,36	0,34
315	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48
400	0,58	0,58	0,59	0,58	0,59	0,58	0,59
500	0,68	0,68	0,69	0,68	0,69	0,67	0,69
630	0,76	0,76	0,77	0,75	0,77	0,74	0,78
800	0,83	0,83	0,84	0,82	0,84	0,81	0,85
1000	0,91	0,91	0,92	0,90	0,92	0,89	0,93
1250	0,93	0,92	0,93	0,92	0,94	0,91	0,94
1600	0,92	0,92	0,92	0,91	0,92	0,91	0,93
2000	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,93	0,91
2500	0,93	0,94	0,93	0,94	0,92	0,95	0,91
3150	0,94	0,94	0,95	0,94	0,95	0,93	0,96
4000	0,96	0,96	0,97	0,95	0,97	0,94	0,97
5000	0,98	0,98	0,97	0,98	0,95	0,97	0,81

Tabla 4.14 Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana de roca de 50 *mm* de ROCKWOOL con distintos valores de *s*.

La Tabla 4.15 presenta los coeficientes de absorción de la muestra de lana mineral CLIMAVÉR NETO de 25 *mm* de espesor de ISOVER, calculados con distintos valores de distancia entre micrófonos *s*.

Frecuencia (Hz)	α $s=0,0286$ m	$s\pm 0,0005$ m		$s\pm 0,001$ m		$s\pm 0,002$ m	
		α $s=0,0281$ m	α $s=0,0291$ m	α $s=0,0276$ m	α $s=0,0296$ m	α $s=0,0266$ m	α $s=0,0306$ m
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
125	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
160	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
200	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
250	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10
315	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15
400	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
500	0,27	0,27	0,27	0,26	0,27	0,26	0,27
630	0,37	0,36	0,37	0,36	0,37	0,35	0,38
800	0,47	0,46	0,48	0,46	0,48	0,45	0,49
1000	0,60	0,59	0,60	0,58	0,61	0,57	0,62
1250	0,73	0,73	0,74	0,73	0,74	0,72	0,75
1600	0,85	0,85	0,84	0,85	0,84	0,86	0,83
2000	0,95	0,95	0,94	0,95	0,94	0,96	0,93
2500	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
3150	0,99	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00
4000	0,97	0,97	0,98	0,96	0,98	0,95	0,99
5000	0,98	0,98	0,96	0,98	0,94	0,97	0,81

Tabla 4.15 Coeficientes de absorción acústica de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER con distintos valores de s .

Los resultados expuestos en las Tablas 4.14 y 4.15 revelan que:

- Hasta la banda de 4000 Hz, desviaciones de 1 mm o inferior provocan variaciones mínimas de α (entorno a 0,01). Una desviación de 2 mm provoca que las variaciones de α aumenten en algunas bandas (entre 0,01 y 0,03).
- En la banda de 5000 Hz, si las desviaciones se cometen por debajo del valor proporcionado por el fabricante, la variación de α es mínima. Sin embargo, si las desviaciones se cometen por encima del valor del fabricante, α disminuye considerablemente a medida que se incrementa la desviación.

La Figura 4.15 compara gráficamente los valores de α obtenidos con la distancia s del fabricante (0,0286 m) y con la desviación de s que provoca mayores variaciones de α (0,0306 m).

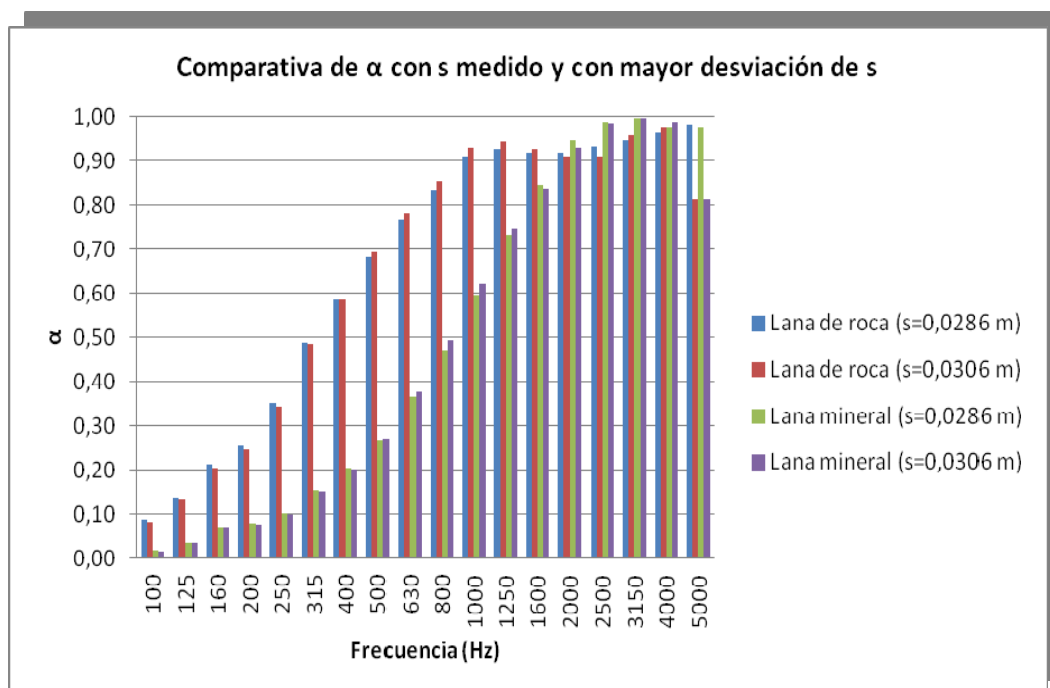


Figura 4.15 Comparativa de valores de α con s del fabricante (0,0286 m) y con mayor desviación de s (0,0306 m).

Mediante este estudio se descubre que, a diferencia de la temperatura, ciertas desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos sí modifican el valor del coeficiente de absorción acústica calculado. En general, en todo el rango de frecuencia las variaciones de α no son excesivas, a excepción de la banda de 5000 Hz si la desviación de la medida de s es de 1 mm o mayor por encima del valor proporcionado por el fabricante, donde se produce una disminución considerable de α . Como conclusión, remarcar que desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos condicionan la precisión del método de ensayo en todo el rango de frecuencias y especialmente en la banda de 5000 Hz en el caso anteriormente mencionado. Por tanto, es muy importante emplear un valor de s lo más preciso posible. Si el tubo de impedancia ha sido adquirido a un fabricante, se debe emplear el valor de s proporcionado por dicho fabricante, ya que suele ser un dato bastante preciso. En caso de tratarse de un tubo propio, debe tenerse mucho cuidado a la hora de asignar el valor de s .

4.2.5.1. En la determinación de la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción acústica.

En este apartado se determinó la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción obtenido en cada ensayo para diferentes intervalos de

variación de la distancia s . Se calculó la incertidumbre expandida U de cada muestra de ensayo a partir de las tres funciones de transferencia medidas en frecuencias discretas (resolución en frecuencia de 25 Hz), según se indica en el apartado 3.3. “Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo”. En el cálculo de la incertidumbre según el método de Monte Carlo, la distancia entre los micrófonos es un parámetro de entrada cuya función de densidad de probabilidad es rectangular. Para que el algoritmo genere la distribución rectangular se deben introducir los extremos del intervalo de la distribución calculados a partir del valor medido y la desviación máxima asignada. Por lo tanto, se fueron modificando los extremos del intervalo en función de la desviación que se quería asignar a la medida de s . Como es lógico, cuanto mayor es la desviación aplicada, mayor es la amplitud del intervalo de la distribución rectangular. De esta manera, se obtuvo una incertidumbre de medida para cada uno de los intervalos de variación asignados a la medida de la separación entre los micrófonos.

La Tabla 4.16 muestra las incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL con distintos intervalos de variación de s . La primera columna de incertidumbre fue calculada teniendo sólo en cuenta la máxima variación posible atribuida a la resolución del equipo de medida, es decir, una variación de $\pm 0,00005\text{ m}$ ya que la resolución del equipo es de $0,0001\text{ m}$.

Frecuencia (Hz)	$\pm U$ ($s \pm 0,00005$ m)	$\pm U$ ($s \pm 0,0005$ m)	$\pm U$ ($s \pm 0,001$ m)	$\pm U$ ($s \pm 0,002$ m)
100	0,005	0,005	0,006	0,008
125	0,004	0,005	0,006	0,009
160	0,002	0,003	0,005	0,009
200	0,002	0,003	0,005	0,009
250	0,002	0,003	0,005	0,008
315	0,002	0,003	0,003	0,004
400	0,002	0,002	0,003	0,005
500	0,002	0,004	0,006	0,012
630	0,001	0,005	0,009	0,018
800	0,005	0,008	0,013	0,023
1000	0,004	0,006	0,010	0,019
1250	0,001	0,004	0,008	0,017
1600	0,001	0,003	0,005	0,011
2000	0,001	0,003	0,007	0,013
2500	0,001	0,005	0,009	0,018
3150	0,001	0,005	0,009	0,019
4000	0,001	0,005	0,010	0,022
5000	0,002	0,011	0,029	0,137

Tabla 4.16 Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana de roca de 50 mm de ROCKWOOL con distintos intervalos de variación de s .

La Tabla 4.17 contiene las incertidumbres de medida asociadas al α de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER con distintos intervalos de variación de s . Al igual que en la Tabla 4.16, la primera columna de incertidumbre fue calculada teniendo sólo en cuenta la máxima variación posible atribuida a la resolución del equipo de medida.

Frecuencia (Hz)	$\pm U$ ($s \pm 0,00005$ m)	$\pm U$ ($s \pm 0,0005$ m)	$\pm U$ ($s \pm 0,001$ m)	$\pm U$ ($s \pm 0,002$ m)
100	0,022	0,022	0,022	0,023
125	0,015	0,015	0,015	0,016
160	0,006	0,006	0,006	0,007
200	0,003	0,004	0,004	0,006
250	0,002	0,003	0,003	0,005
315	0,002	0,002	0,003	0,004
400	0,002	0,002	0,002	0,002
500	0,006	0,006	0,007	0,008
630	0,006	0,007	0,009	0,015
800	0,007	0,009	0,014	0,024
1000	0,002	0,007	0,013	0,025
1250	0,001	0,004	0,008	0,015
1600	0,002	0,004	0,007	0,014
2000	0,006	0,007	0,010	0,017
2500	0,000	0,001	0,002	0,005
3150	0,000	0,002	0,003	0,007
4000	0,001	0,005	0,011	0,022
5000	0,004	0,014	0,033	0,135

Tabla 4.17 Incertidumbres asociadas al α de la muestra de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER con distintos intervalos de variación de s .

En todo el rango de frecuencia se observa un incremento de la incertidumbre a medida que aumenta la desviación aplicada. Este incremento de la incertidumbre se aprecia más claramente cuanto mayor es la frecuencia. Además, el mayor incremento se produce en la banda de tercio de octava de 5000 Hz, donde se obtienen unas incertidumbres muy elevadas, sobretodo, la correspondiente a la desviación de 0,002 mm. La Figura 4.16 compara gráficamente los valores de U obtenidos con la mínima desviación de s ($\pm 0,00005$ m) y con una desviación de $\pm 0,001$ m.

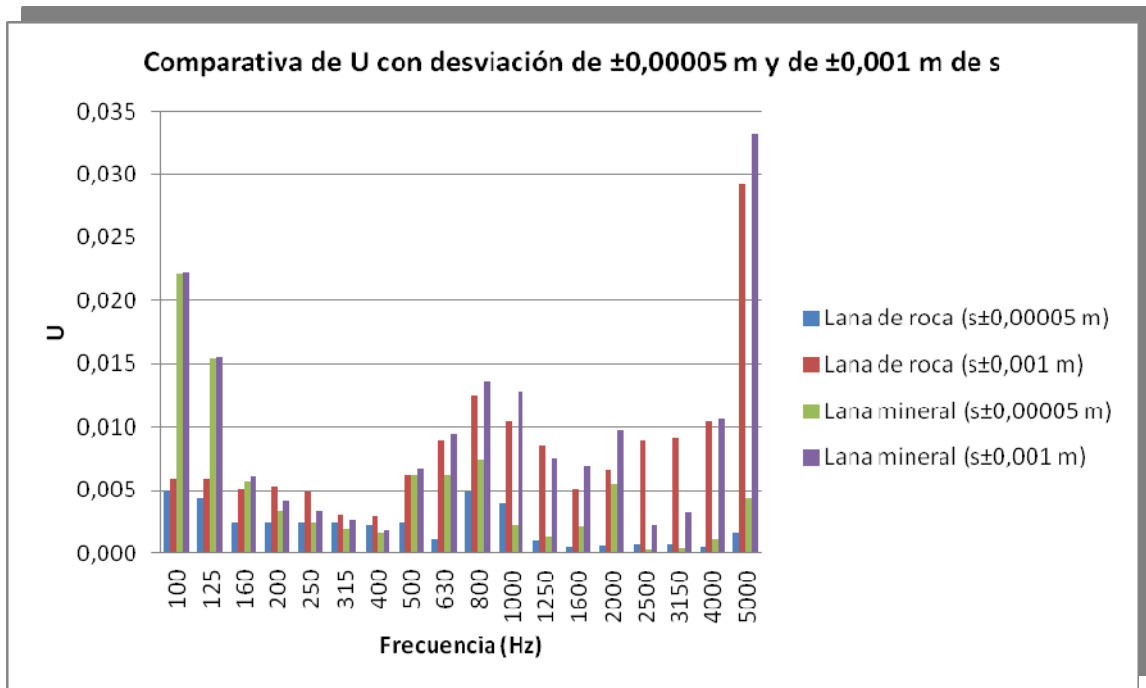


Figura 4.16 Comparativa de valores de U con mínima desviación de s ($0,00005$ m) y con desviación de $0,001$ m.

El estudio revela que desviaciones en la medida de la separación entre los micrófonos, sí influye en la determinación de la incertidumbre de medida en todo el rango de frecuencia, especialmente en la banda de 5000 Hz, tal y como se observa en las Tablas 4.16 y 4.17. Por tanto, es muy importante emplear un valor de s lo más preciso posible.

5 Conclusiones y futuras líneas de investigación

5.1. Conclusiones.

El presente trabajo se ha centrado en la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal en tubo de impedancia, mediante el método de la función de transferencia descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002. Se puede decir que el principal problema de este método de ensayo reside en que los resultados obtenidos son difícilmente extrapolables al entorno real, es decir, una vez que el material ha sido instalado, ya que, por ejemplo, no tiene en cuenta el efecto de instalación y los posibles defectos que dicha instalación puede provocar, al contrario que el método en cámara reverberante donde las condiciones se aproximan más a la realidad. Sin embargo, el método de ensayo en tubo de impedancia es muy útil para estudios de investigación y desarrollo de nuevos materiales para su posterior uso en obra, puesto que es un método rápido de ejecutar y solo se necesitan pequeñas muestras del material.

En cuanto a la precisión del método de la función de transferencia, se ha estudiado la influencia de distintos factores en la repetibilidad del mismo, obteniendo las conclusiones que seguidamente se comentan.

Cuando se ensayan muestras uniformes, como las estudiadas en este trabajo, la dispersión entre medidas de la misma muestra es baja, siempre y cuando la muestra se coloque de forma adecuada para cada medición. Por consiguiente, la influencia de la colocación de la muestra en la repetibilidad del método de ensayo es pequeña, obteniéndose resultados precisos. Sin embargo, la posible falta de experiencia del técnico en la aplicación del método de ensayo, puede provocar que la dispersión entre medidas de la misma muestra sea mayor debido a una mala ejecución del procedimiento como, por ejemplo, una colocación inadecuada de la muestra. Por tanto, la falta de experiencia del técnico es un factor influyente en la incertidumbre de medida y en la precisión del método de ensayo. La manera de reducir la incertidumbre debida a la variabilidad aleatoria de una serie de mediciones de la misma muestra es aumentando el número de mediciones. En relación a esto, un estudio realizado en el presente trabajo revela la importancia de repetir las medidas de la misma muestra, al menos, tres veces.

La desviación entre medidas de distintas muestras del mismo material aumenta con respecto a la dispersión entre medidas de la misma muestra. Esto revela que la influencia del corte de las muestras en la repetibilidad del método es mayor que la de su colocación. Por tanto, se puede concluir que el corte de la muestra es un factor a

tener en cuenta a la hora de evaluar la precisión de este método de ensayo, obteniéndose resultados menos precisos pues el corte de la muestra es claramente un foco de dispersión. Debido a esto, surge la necesidad de estudiar en un mismo ensayo varias muestras del mismo material, para así tener en cuenta la variabilidad producida por el corte de las muestras, puesto que el proceso de corte es una fase más del ensayo. Por este motivo, en el presente trabajo se ha propuesto realizar el ensayo con, al menos, tres muestras del material bajo estudio, pudiendo ser más dependiendo de los valores de la incertidumbre.

En cuanto al efecto sobre el resultado de un ensayo de posibles desviaciones en la medida de la temperatura se puede decir que, incluso desviaciones de hasta $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto al valor medido, apenas modifican los valores del coeficiente de absorción y de la incertidumbre de medida. Por consiguiente, se puede concluir que la precisión de este método de ensayo no está condicionada por posibles desviaciones en la medida de la temperatura. Esta conclusión es aplicable a condiciones ambientales de laboratorio normales, en torno a los $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. No se puede afirmar que desviaciones en la temperatura en condiciones ambientales extremas (por ejemplo, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) no influyen en el resultado de un ensayo.

Por el contrario, ciertas desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos s , sí modifican el valor del coeficiente de absorción acústica. En general, en todo el rango de frecuencias se producen leves variaciones de α , excepto en la banda de 5000 Hz , donde el valor de α disminuye considerablemente a medida que aumenta la desviación de la medida de s por encima del valor real. En cuanto a la incertidumbre, ésta aumenta en todo el rango de frecuencias a medida que la desviación también lo hace, siendo más evidente este incremento en alta frecuencia. El mayor aumento se produce en la banda de 5000 Hz , donde se obtienen incertidumbres muy elevadas. Por tanto, desviaciones en la medida de la separación entre los micrófonos con respecto al valor real, sí influyen en los valores del coeficiente de absorción acústica y de la incertidumbre de medida en todo el rango de frecuencia, especialmente en la banda de 5000 Hz . Esto refleja la importancia de emplear un valor de s lo más preciso posible. Si el tubo de impedancia ha sido adquirido a un fabricante, se debe emplear el valor de s proporcionado por dicho fabricante, ya que suele ser un dato bastante preciso. En caso de tratarse de un tubo propio, debe tenerse mucho cuidado a la hora de asignar el valor de s .

Con respecto al método de Monte Carlo, resulta ser un método muy útil para la evaluación de la incertidumbre en situaciones en las que el enfoque clásico de la GUM no es aplicable o es difícil de aplicar debido a la complejidad del modelo, como sucede con el método bajo estudio. El procedimiento descrito en este trabajo para estimar la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción acústica de un ensayo mediante el método de Monte Carlo, proporciona valores de incertidumbre a partir de datos primarios (funciones de transferencia en frecuencias discretas), siendo estos valores coherentes con las desviaciones entre los resultados finales obtenidos (coeficientes de absorción acústica en tercios de octava), lo cual es muy importante puesto que es un indicativo de su buena aplicación. Además, la evaluación que se realiza de la incertidumbre es compatible con los resultados de repetibilidad obtenidos en la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1. La principal componente de incertidumbre asociada al resultado de un ensayo se corresponde con la desviación entre medidas (incertidumbre tipo A). Puesto que el corte de las muestras genera dispersión entre medidas, se puede decir que el corte es una fuente importante de incertidumbre.

En definitiva, el método del tubo de impedancia se puede considerar un método preciso, ya que las medidas se realizan en condiciones definidas y controladas, obteniéndose resultados repetibles, y cuya principal fuente de imprecisión es el corte de las muestras.

5.2. Futuras líneas de investigación.

Como futuras líneas de investigación se propone analizar la influencia de la colocación de muestras con superficie irregular en la precisión del método, ya que en este trabajo solo se ha trabajado con muestras uniformes. También se propone estudiar el efecto sobre el resultado de medida del recubrimiento del borde de la muestra en los casos en que sea necesario, como por ejemplo, para sellar huecos mediante vaselina o cera, fijar más firmemente la muestra tapando o engrasando la totalidad del borde o rellenar espacios de aire indeseado mediante masilla.

ANEXOS

ANEXO A

Procedimiento de cálculo para la presentación del coeficiente de absorción acústica en bandas de tercio de octava

En este anexo se indica la forma de calcular el coeficiente de absorción en cada tercio de octava a partir de los datos primarios que aporta el sistema de medida en frecuencias discretas.

En los ensayos realizados en el presente proyecto se determina el coeficiente de absorción hasta 10000 Hz , con una resolución en frecuencia de 25 Hz . Sin embargo, el coeficiente de absorción de cada muestra de ensayo se presenta finalmente en bandas de tercios de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz . Para poder determinar qué frecuencias pertenecen a cada una de las bandas, se deben calcular las frecuencias de corte inferior y superior a partir de la frecuencia central exacta de cada banda, y no la nominal. La determinación de las frecuencias exactas se realiza según la norma UNE-EN 61260 “*Electroacústica. Filtros de bandas de octava y de bandas de fracción de octava*”.

La frecuencia central exacta de cada banda se determina a partir de:

$$f_m = 2^{x/3} \cdot f_r \quad (A.1)$$

donde

x , es cualquier número entero, positivo, negativo o cero;

f_r , es la frecuencia de referencia, 1000 Hz .

Las frecuencias de los límites inferior y superior de cada banda, f_1 y f_2 respectivamente, se determinan a partir de:

$$f_1 = 2^{(-1/6)} \cdot f_m \quad (A.2)$$

y

$$f_2 = 2^{1/6} \cdot f_m \quad (A.3)$$

siendo f_m , la frecuencia central exacta de la banda de tercio de octava, determinada a partir de la ecuación (A.1).

La Tabla A.1 contiene las frecuencias centrales exactas y nominales, así como sus respectivas frecuencias laterales, de las bandas de tercios de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz .

Índice x	Frecuencia nominal (Hz)	Frecuencia exacta f_m (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)
-10	100	99,213	88	111
-9	125	125,00	111	140
-8	160	157,49	140	177
-7	200	198,43	177	223
-6	250	250,00	223	281
-5	315	314,98	281	354
-4	400	396,85	354	445
-3	500	500,00	445	561
-2	630	629,96	561	707
-1	800	793,70	707	891
0	1000	1000,0	891	1122
1	1250	1259,9	1122	1414
2	1600	1587,4	1414	1782
3	2000	2000,0	1782	2245
4	2500	2519,8	2245	2828
5	3150	3174,8	2828	3564
6	4000	4000,0	3564	4490
7	5000	5039,7	4490	5657

Tabla A.1 Frecuencias centrales y laterales de los tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz .

Para obtener el valor del coeficiente de absorción de un tercio de octava, se deben promediar los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a las frecuencias comprendidas entre las frecuencias inferior y superior de dicho tercio de octava.

ANEXO B

Muestra de calibración

Para llevar a cabo la corrección por desajuste entre los canales de los micrófonos mediante el procedimiento del factor de calibración predeterminado, se debe insertar en el portamuestras una muestra de material absorbente, definida como muestra de calibración especial. En este caso, la muestra de calibración que proporciona el fabricante es una espuma que denomina AAP 95 (Figura B.1), cuyo coeficiente de absorción acústica medido en el presente trabajo y proporcionado por el fabricante se muestran en la Figura B.2.



Figura B.1 Muestra de calibración (espuma AAP 95).

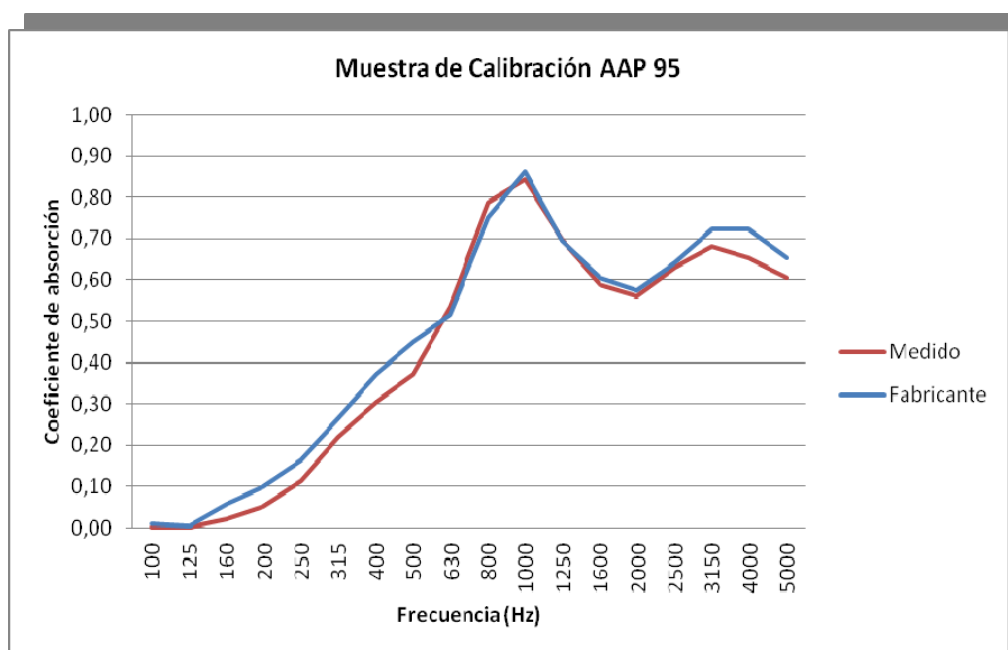


Figura B.2 Coeficiente de absorción de la muestra de calibración.

ANEXO C

Procedimiento de cálculo de los parámetros acústicos en una hoja de cálculo Excel

En este trabajo se ha realizado un procedimiento de cálculo en Excel para determinar los parámetros acústicos de un material a partir de las funciones de transferencia medidas. Este procedimiento se basa en la formulación expuesta en la norma UNE-EN ISO 10534-2 y pretende realizar la misma función que el software propio de ACUPRO, empleado para determinar los parámetros acústicos. Destacar que durante todo el procedimiento de cálculo se opera con números complejos (parte real e imaginaria), ya que es como el software dBFA entrega las funciones de transferencia.

Puesto que la corrección por desajuste entre los canales de los micrófonos se realiza mediante el procedimiento del factor de calibración predeterminado, el primer paso consiste en calcular el factor de calibración H_c a partir de las funciones de transferencia medidas H_{12}^I y H_{21}^H . Para ello, se usa la ecuación (2.38) considerando que Symphonie mide las funciones de transferencia en una dirección (del canal 1 al canal 2). El software ACUPRO genera un archivo de texto que contiene los valores de módulo y fase (en grados) de H_c , siendo estos valores exactamente iguales a los calculados mediante este procedimiento en EXCEL. Para corregir la función de transferencia medida \hat{H}_{12} con el factor de calibración H_c se emplea la ecuación (2.39), resultando la función de transferencia corregida H_{12} .

A continuación, se calculan las funciones de transferencia H_I y H_R según las ecuaciones (2.28) y (2.29), respectivamente. Para ello, se necesitan calcular previamente c_0 y el número de onda k_0 mediante las ecuación (2.35) y (2.2), respectivamente. Tanto la distancia s como x_1 se introducen en las ecuaciones en metros. Con estos datos ya se pueden determinar los parámetros acústicos de un material. Primero se calcula el coeficiente de reflexión r con la ecuación (2.40). A partir de r se determina el coeficiente de absorción acústica α mediante la ecuación (2.41). La impedancia acústica específica ($Z / \rho c_0$) también se determina a partir de r empleando la ecuación (2.42). Por último, la admitancia acústica específica ($\rho c_0 / Z$) es la inversa de la impedancia acústica específica, según la ecuación (2.44).

A continuación, se comparan de forma gráfica los valores de los parámetros acústicos de la muestra de calibración obtenidos por el procedimiento en Excel y por el software ACUPRO. Las gráficas representan los parámetros acústicos en frecuencias discretas de 100 Hz a 5650 Hz , las cuales se corresponden con los tercios de octava de 100 Hz a 5000 Hz .

La Figura C.1 muestra los coeficientes de reflexión a incidencia normal de la muestra de calibración obtenidos en el procedimiento en Excel y en el software ACUPRO.

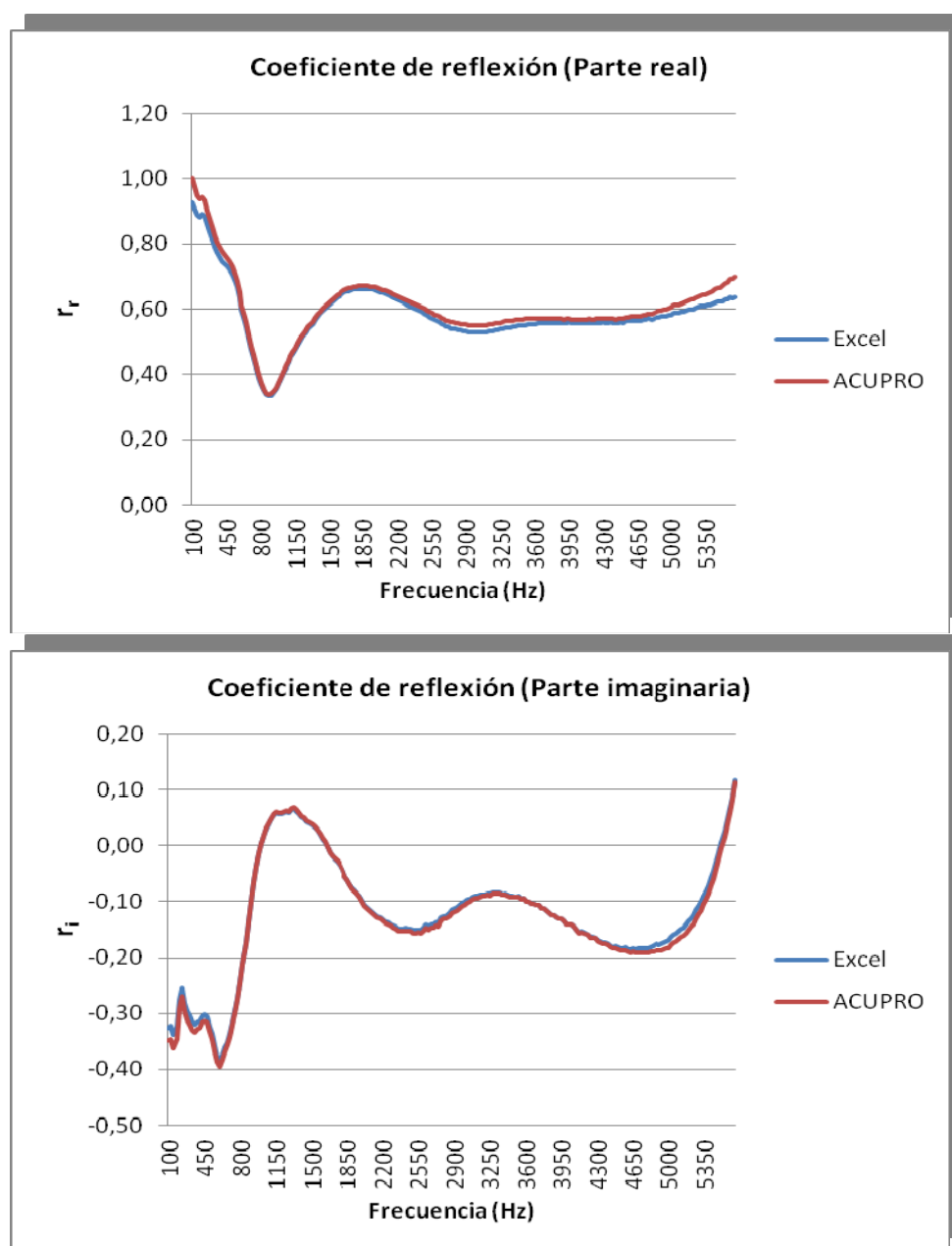


Figura C.1 Parte real (arriba) e imaginaria (abajo) de los coeficientes de reflexión de la muestra de calibración obtenidos en Excel y en ACUPRO.

En la Figura C.2 se observan los coeficientes de absorción acústica a incidencia normal de la muestra de calibración obtenidos en el procedimiento en Excel y en el software ACUPRO.

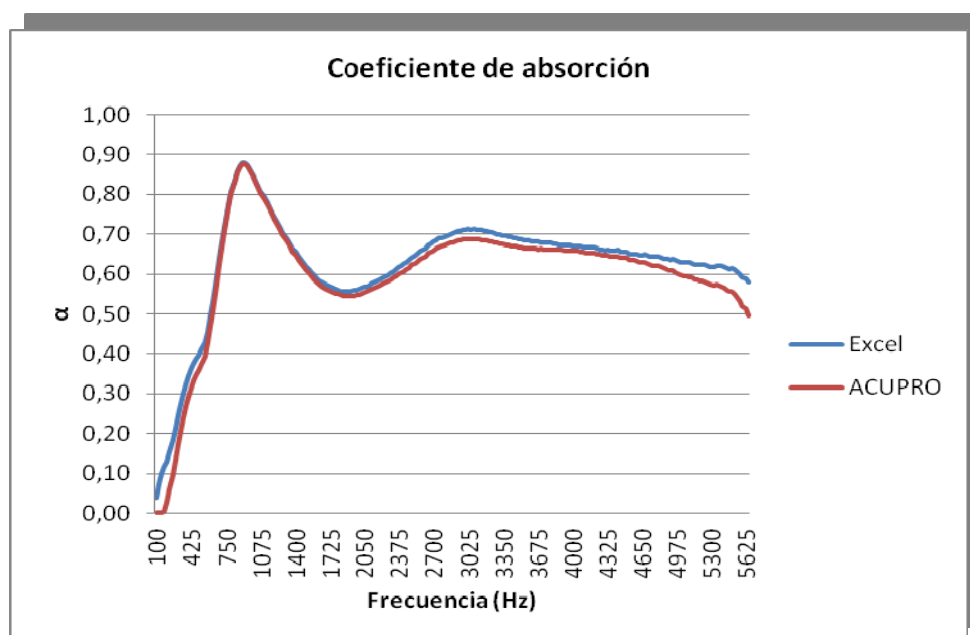


Figura C.2 Coeficientes de absorción de la muestra de calibración obtenidos en Excel y en ACUPRO.

La Figura C.3 representa gráficamente los valores de impedancia acústica específica de la muestra de calibración obtenidos en el procedimiento en Excel y en el software ACUPRO.

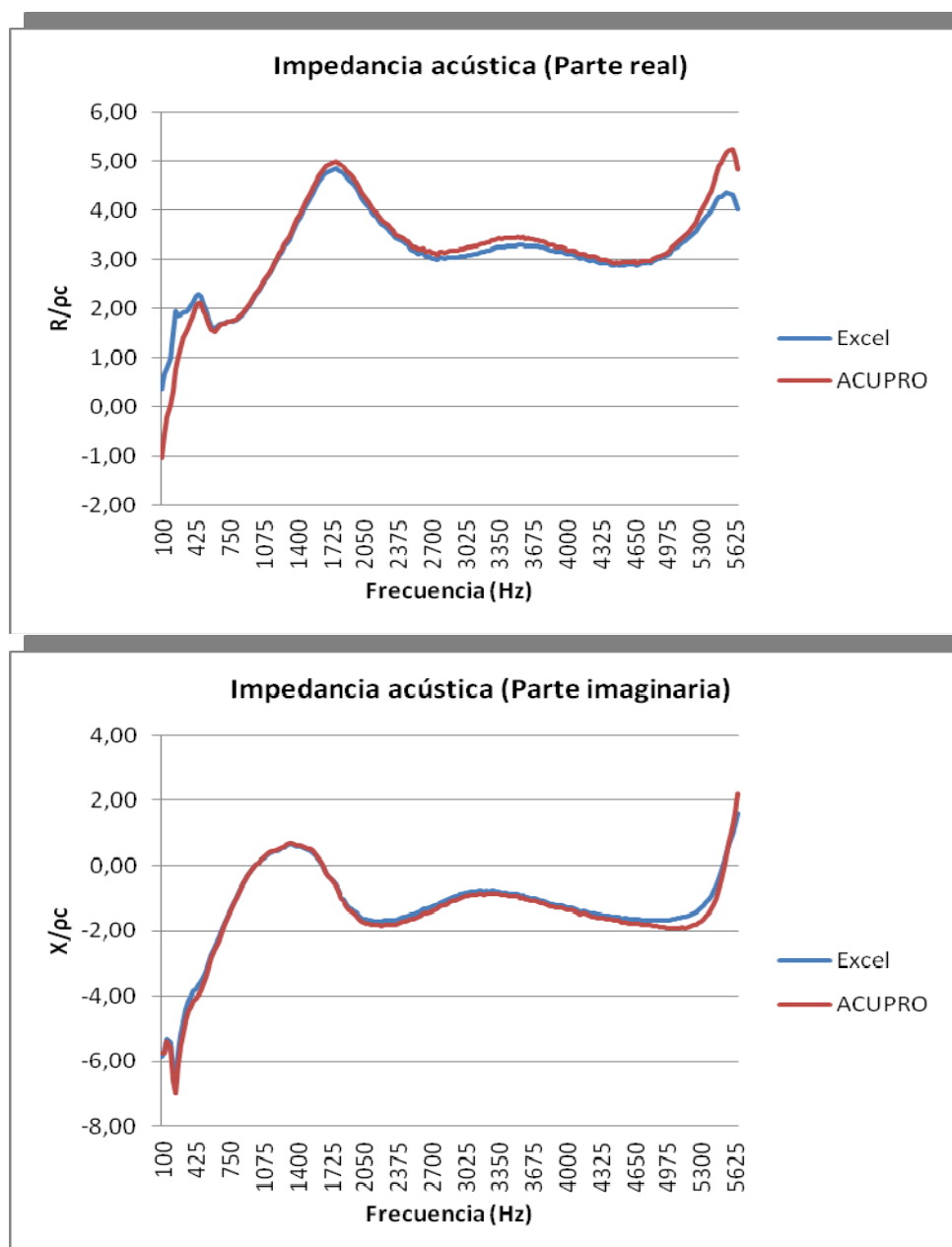


Figura C.3 Parte real (arriba) e imaginaria (abajo) de la impedancia acústica específica obtenida en Excel y en ACUPRO.

En relación a la determinación de la admitancia acústica específica, los valores que proporciona el software de ACUPRO son elevados y no coinciden con los calculados en Excel. El motivo es que el software multiplica la admitancia por la impedancia característica ρc_o , es decir, $\frac{\rho c_o}{Z} \times \rho c_o$. Se desconoce el motivo por el cual el software de ACUPRO realiza ese cálculo. Si la admitancia acústica específica que proporciona ACUPRO se divide entre ρc_o , se obtienen valores de admitancia acústica específica aproximados a los calculados mediante el procedimiento en Excel. La

Figura C.4 muestra los valores de admitancia acústica específica de la muestra de calibración obtenidos en el procedimiento en Excel y en el software ACUPRO (tras realizar la división anteriormente mencionada).

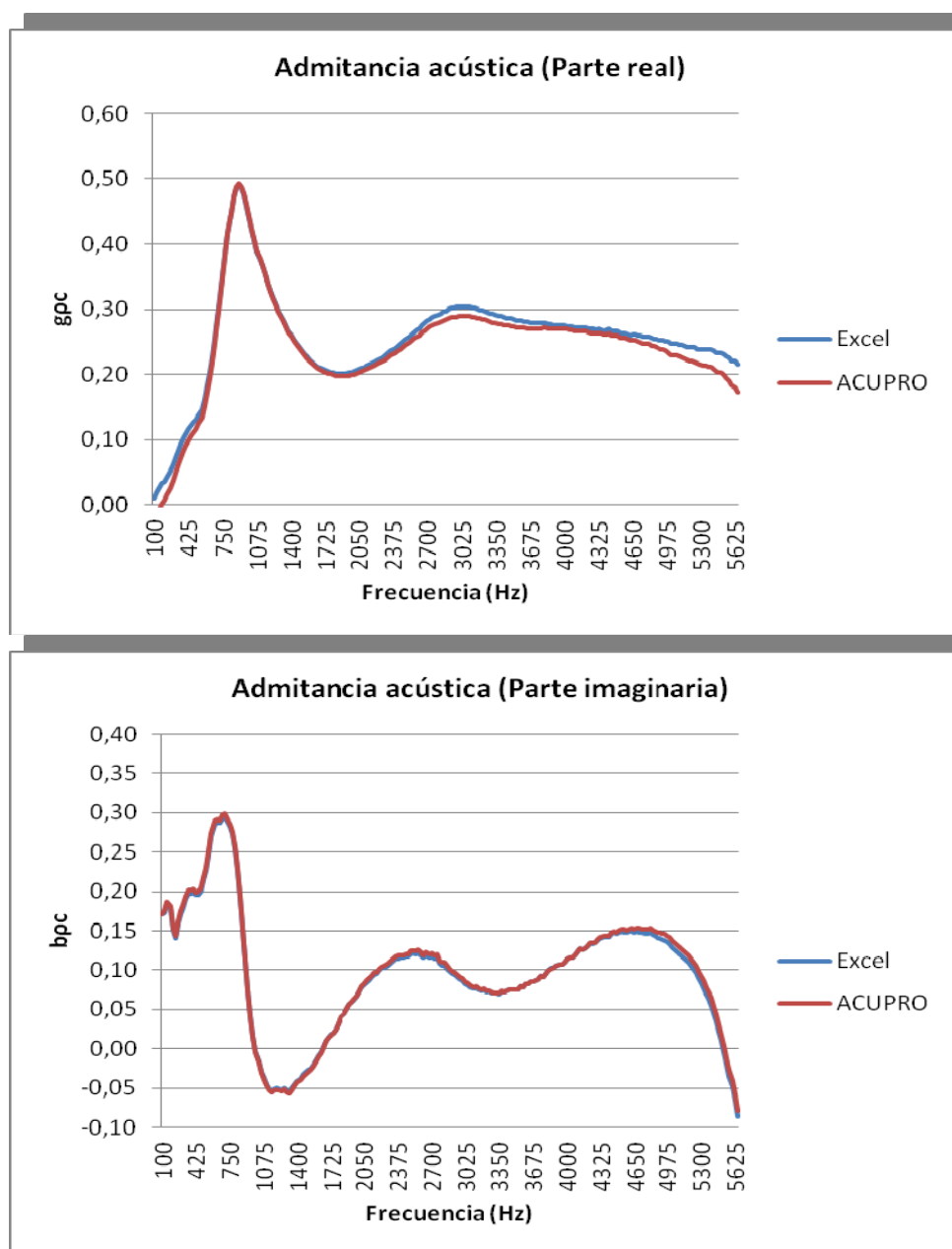


Figura C.4 Parte real (arriba) e imaginaria (abajo) de la admitancia acústica específica obtenida en Excel y en ACUPRO.

Analizando los resultados se observan algunas diferencias entre los valores obtenidos mediante el procedimiento en Excel y los que proporciona el software ACUPRO. Estas diferencias posiblemente sean atribuidas a que el número de onda k_0 empleado en los cálculos en Excel no incluye la constante de atenuación en el tubo

k_0'' , mientras que el software de ACUPRO sí aplica corrección por absorción latente del tubo [3]. Según la Norma UNE-EN ISO 10534-2, normalmente esta atenuación no influye en los resultados obtenidos usando los métodos dados en esa parte de la norma. No obstante, la norma comenta que sí deben aplicarse correcciones por pérdidas en la evaluación de las magnitudes cuando la distancia desde la superficie de la muestra en ensayo al micrófono más cercano es mayor que tres veces el diámetro. Puesto que la distancia entre la muestra y el micrófono más cercano es 0,0509 *m* y el diámetro del tubo es 0,0349 *m* (tres veces el diámetro es 0,1047 *m*), en este caso no es necesario aplicar correcciones.

ANEXO D

Parámetros acústicos de los materiales ensayados

Con este ANEXO se pretende completar la información acerca de los materiales acústicos que se han ensayado en el presente trabajo. Para ello, se proporcionan los siguientes parámetros acústicos de cada material: coeficiente de reflexión a incidencia normal, coeficiente de absorción acústica a incidencia normal, impedancia acústica específica y admitancia acústica específica. Los valores de coeficiente de absorción corresponden con los valores asignados en la intercomparación AQUUS-TUBO_IMPEDANCIA_1. El resto de parámetros han sido obtenidos de los ensayos llevados a cabo durante la realización del trabajo.

La Tabla D.1 contiene los parámetros acústicos del material de lana de roca de 50 *mm* de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente de reflexión		Coeficiente de absorción	Impedancia acústica específica		Admitancia acústica específica	
	Real	Imaginario		Real	Imaginario	Real	Imaginario
100*	1,01	-0,15	0,08	-1,39	-11,45	-0,01	0,08
125*	0,96	-0,27	0,10	0,27	-7,32	0,00	0,14
160*	0,89	-0,33	0,17	0,78	-5,38	0,03	0,18
200*	0,87	-0,30	0,23	1,36	-5,66	0,04	0,17
250*	0,79	-0,36	0,32	1,43	-4,21	0,08	0,22
315*	0,65	-0,42	0,41	1,32	-2,84	0,14	0,29
400*	0,56	-0,42	0,57	1,38	-2,29	0,20	0,32
500*	0,47	-0,40	0,71	1,40	-1,80	0,27	0,35
630**	0,37	-0,36	0,79	1,40	-1,38	0,37	0,36
800	0,32	-0,31	0,84	1,42	-1,10	0,45	0,35
1000	0,25	-0,30	0,89	1,31	-0,92	0,52	0,37
1250	0,18	-0,16	0,91	1,37	-0,45	0,67	0,23
1600	0,25	-0,13	0,90	1,58	-0,45	0,60	0,17
2000	0,26	-0,14	0,90	1,61	-0,50	0,57	0,18
2500	0,24	-0,17	0,91	1,53	-0,55	0,59	0,22
3150	0,19	-0,18	0,94	1,36	-0,52	0,65	0,25
4000	0,14	-0,17	0,96	1,24	-0,44	0,73	0,26
5000**	0,20	-0,07	0,97	1,44	-0,19	0,66	0,10

Tabla D.1 Parámetros acústicos del material de lana de roca de 50 *mm* de ROCKWOOL, modelo 231.652.

La Tabla D.2 contiene los parámetros acústicos del material de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente de reflexión		Coeficiente de absorción	Impedancia acústica específica		Admitancia acústica específica	
	Real	Imaginario		Real	Imaginario	Real	Imaginario
100*	1,03	-0,10	0,02	-7,71	-18,58	-0,02	0,05
125*	1,02	-0,16	0,03	-2,26	-12,23	-0,01	0,08
160*	0,99	-0,23	0,05	-0,57	-8,75	-0,01	0,12
200*	0,99	-0,19	0,07	-0,23	-10,36	0,00	0,10
250*	0,95	-0,24	0,11	0,42	-8,23	0,01	0,13
315*	0,88	-0,35	0,15	0,75	-5,20	0,03	0,19
400*	0,82	-0,39	0,20	0,94	-4,23	0,05	0,23
500*	0,74	-0,43	0,27	1,06	-3,40	0,09	0,27
630**	0,62	-0,47	0,36	1,09	-2,58	0,14	0,33
800	0,50	-0,47	0,52	1,12	-2,02	0,21	0,39
1000	0,38	-0,46	0,64	1,09	-1,56	0,30	0,44
1250	0,28	-0,43	0,75	1,07	-1,23	0,41	0,48
1600	0,14	-0,36	0,85	0,97	-0,83	0,61	0,52
2000	0,10	-0,22	0,92	1,11	-0,51	0,76	0,35
2500	0,13	-0,13	0,98	1,25	-0,34	0,76	0,21
3150	0,15	-0,09	0,98	1,33	-0,26	0,74	0,14
4000	0,18	-0,10	0,97	1,41	-0,30	0,69	0,14
5000**	0,25	-0,07	0,95	1,62	-0,22	0,59	0,09

Tabla D.2 Parámetros acústicos del material de lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de ISOVER.

Notas:

* El tercio de octava se encuentra fuera del intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia empleado, según la norma UNE-EN ISO 10534-2.

** Algunas frecuencias del tercio de octava se encuentran fuera del intervalo de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia empleado, según la norma UNE-EN ISO 10534-2.

Ambas anotaciones no afectan a los valores del coeficiente de absorción acústica puesto que corresponden con los valores asignados en la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNE-EN ISO 10534-1:2002 — Acústica. “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 1: Método del rango de onda estacionaria”.
- [2] UNE-EN ISO 10534-2:2002 — Acústica. “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”.
- [3] <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/acustica-y-vibraciones/tubos-de-impedancia-kundt/tubo-de-impedancia-kundt-spectronics-acupro/documentos/>
- [4] Spectronics, Inc. y Alava Ingenieros. “Manual ACUPRO Versión 4. Medida de las propiedades acústicas de materiales y sistemas”, 2009.
- [5] M^a Belén Catalán Almendros. “Realización de un Procedimiento para la Medida del Coeficiente de Absorción Sonora Normal”. Trabajo Final de Máster (MIAEMA), Julio 2013.
- [6] AREVA. “dBFA software suite. USER MANUAL”, 2008.
- [7] Centro Español de Metrología. “Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida”, 2008.
- [8] Alicia Maroto, Ricard Boqué, Jordi Riu, F. Xavier Rius. “Incertidumbre y precisión”. Universitat Rovira i Virgili.
- [9] Centro Español de Metrología. “Evaluación de datos de medición — Suplemento 1 de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida — Propagación de distribuciones aplicando el método de Monte Carlo”, 2010.
- [10] <http://www.mathworks.es/es/help/matlab/index.html>
- [11] Gustavo Delgado. “Metodología para la implementación del método adaptativo de Monte Carlo en la evaluación de la incertidumbre de medición, utilizando el cálculo simbólico Maple. Aplicación a un experimento sencillo”. UNAN-León, Editorial Universitaria. Universitas, Volumen 3, Número 2, 2009, 22-32, ISSN 2071-2575.
- [12] UNE 82009-1:1998 — “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 1: Principios generales y definiciones”.

- [13] UNE 82009-2:1999 — “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado”.
- [14] ASTM E1050-90 — “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”, 1998.
- [15] UNE-EN 61260:1997 — Electroacústica. “Filtros de bandas de octava y de bandas de una fracción de octava”.